

Studienarbeit

Literaturrecherche zur Wirkungsweise der Hagelabwehr mit Silberjodid-(AgI) Generatoren

vorgelegt von:

Seyit Yazar

Betreuer

1. Prüfer Prof. Dr., Thomas Oppenländer
2. Prüfer Prof. Dr., Richard Erpelding

Villingen-Schwenningen, den 26.02.2017

Kurzfassung

Thema der Studienarbeit:

Literaturrecherche zur Wirkungsweise der Hagelabwehr mit Silberjodid-(Agl) Generatoren

Verfasser: Seyit Yazar

1. Betreuer: Prof. Dr. Thomas Oppenländer

2. Betreuer: Prof. Dr. Richard Erpelding

Semester: 6. Semester

Kurzfassung:

Vonnegut vom General Electric Research hat zusammen mit Langmuir und Schäfer in 1947 die Eigenschaft von Silberjodid (Agl) Niederschläge wie Regen, Schnee, Eis auszulösen, untersucht. Hierfür werden die Gewitterwolken im frühen Entwicklungsstadium im Bereich der Aufwindzonen angefliegen. Bei einer Höhe zwischen ein und fünf Kilometer werden die Agl-Generatoren, die an den Flugzeugtragflächen angebracht sind, eingeschaltet. Die Generatoren verbrennen die Lösung, die als Komplex zusammen mit Wasser und Aceton im Behälter vorliegt. Der entstehende Silberjodid-Rauch löst einen Niederschlag in Form von Regen, Schnee oder Graupel aus. Die Gewitterwolke verliert dadurch die erforderliche Energie, um größere Hagelkörner zu bilden. Die Effektivität von Silberjodid-Kristallen zur Bildung von Eiskristallen und Niederschlägen wird auf die hexagonale Struktur zurückgeführt, wie sie auch die Eiskristalle in der Luft haben. Die optimale Menge, mit der die Wolken geimpft werden liegt bei 11 g pro Liter Lösung. Aufgrund der geringen Löslichkeit von Silberjodid in Wasser wird die Löslichkeit in Komplexen wie z.B. im Agl-KI-Wasser-Aceton-Gemisch gesteigert. Die Impfung der Gewitterwolken ist bei Aufwinden zwischen 3 m/s und 5 m/s, also im Frühstadium effektiv. Dabei spielt jedoch auch die Partikelgröße eine entscheidende Rolle. Monodisperse Partikel mit einem Durchmesser von 10 Nanometern sind bis zu Temperaturen von -17 °C und Partikel mit 100 Nanometer Durchmesser sind bei etwa -10 °C aktiv. Die Versuche belegen eine effektive Eiskristallbildungsfähigkeit von Silberjodid ab -5 °C. Unter Laborbedingungen ist stets eine Wirksamkeit ermittelt worden. Bei Versuchen unter realen Bedingungen schwankt die effektive Temperatur ab der das Silberjodid Eiskristalle bildet. Das standardisierte Vorgehen bei der Wolkenimpfung dient daher der Vermeidung von Abweichungen bei der Ermittlung der Effektivität von Silberjodid.

Schlüsselwörter:

Silberjodid, Silberjodid-Komplexe, Löslichkeit Silberjodid, Eigenschaften Silberjodid, Eiskristallbildung, künstliche Niederschläge, künstliche Niederschlagsbildung, Vonnegut, Schäfer, Langmuir, Wolkenauflösung, Gewitterwolken, Hagelabwehr, Impfen, Wolkenimpfen, Graupel, Schnee, hexagonale Struktur, Eiskristall, Aufwind, Abwind, Hagelentstehung, Silberjodid-Brenner, Silberjodid-Generator, Silberjodid-Rauch, Keimbildung, Eiskeimbildung.

Abstract**Title of Project:**

Literature research of effectiveness of hail defense with silver iodide (Agl) generators

Author:

Seyit Yazar

1. Examiner:

Prof. Dr. Thomas Oppenländer

2. Examiner:

Prof. Dr. Richard Erpelding

Semester:

6. Semester

Abstract:

Vonnegut from the General Electric Research Institute and also Langmuir and Schäfer, investigated the ability of silver iodide (Agl) in 1947. They found that silver iodide is able to form ice crystals, precipitate rain and snow. For this purpose the thunderclouds are seeding in the early development stage in the area of the wind-up zones. At an altitude between one and five kilometers, the AgI generators mounted on the aircraft support surfaces are switched on. The generators burn the solution, which is present as a complex together with water and acetone in the tank. The resulting silver iodide smoke is the precipitation in the form of rain, snow or sleet. The thunder cloud thereby loses the energy required to form larger hail grains. The effectiveness of silver iodide crystals for the formation of ice crystals and precipitates is attributed to the hexagonal structure, as are the ice crystals in the air. The optimum amount with which the clouds are inoculated is 11 g per liter of solution. Because of the low solubility of silver iodide in water, the solubility in complexes such as in the AgI-KI-water-acetone mixture are higher. The inoculation of the thunderclouds is effective at upwind between 3 m / s and 5 m / s, in the early stage. However, the particle size also plays a decisive role. Monodispers particles with a diameter of 10 nanometers are active at temperatures of -17°C and particles with a diameter of 100 nanometers are active at about -10°C . The experiments demonstrate an effective ice crystallization capacity of silver iodide at -5°C . The effectiveness has always been determined under laboratory conditions. In experiments under real conditions, the effective temperature is partly different and varies in the ability to form ice crystals. The standardized procedure for cloud seeding therefore serves to avoid deviations in the determination of the effectiveness of silver iodide.

Keywords:

Silver iodide, silver iodide complexes, solubility silver iodide, characteristics silver iodide, ice crystal formation, artificial precipitation, artificial precipitation formation, vonnegut, schaefer, langmuir, cloud resolution, thunderclouds, hail, hailstorms, seeding, cloud seeding, sleet, snow, hexagonal structure, ice crystal, wind , Blow-off, hail formation, silver iodide burner, silver iodide generator, silver iodide smoke, nucleation, ice nucleation.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unzulässige fremde Hilfe angefertigt habe.

Die verwendeten Literaturangaben sind im Literaturverzeichnis vollständig zitiert.

Villingen-Schwenningen, den 26.02.2017

Adresse: Lehenerstr. 72
79106 Freiburg im Breisgau

Unterschrift:

A photograph of a handwritten signature in black ink on a light-colored background. The signature appears to read 'Sajit Yazar' in a cursive script.

Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole

Chemische Zeichen:

AgBr	Silberbromid
AgI	Silberjodid
AgN ₃	Silberazid
AgNO ₃	Silbernitrat
H ₄ C ₄ O ₂ NBr	N-bromosuccinimid
KCl	Kaliumchlorid
KI	Kaliumjodid
KNO ₃	Kaliumnitrat
MgSO ₄	Magnesiumsulfat
NaCl	Natriumchlorid
NaI	Natriumjodid
NH ₄ I	Ammoniumjodid
PETN	Pentaerythriol – tetranitrat

Formelzeichen:

Ei	--	Wirkungsgrad Eis in Wolke
EI	--	Wirkungsgrad flüssiger Wasserdampf i. W.
J	s ⁻¹	Bildungsrate der Eiskristalle
N	--	Anzahl gebildeter Eiskristalle im Labor
Na	--	Anzahl gebildeter Eiskristalle real
N ₀	--	Anzahl anfänglich vorhandener Eiskristalle
t	s	Dauer
T	K	Temperatur
uT	s ⁻¹	Fallgeschwindigkeit
Xi	mg/l	Konzentration an Eis
XI	mg/l	Konzentration an flüssigem Wasserdampf

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	II
Eidesstattliche Erklärung.....	III
Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole	IV
Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
2 Vorstellung des Vereins Hagelabwehr Südwest e.V.	3
2.1 Optimale Verfahrensbeschreibung der Hagelabwehr mit Flugzeugen.	4
3 Die Hagelentstehung.....	5
3.1 Untersuchungen zur Hagelentstehung in Cumulonimbus Wolken	7
3.2 Zusammenfassung	9
4 Abgrenzung zu anderen Verfahrensarten und Lösungen.....	10
4.1 Weitere Mittel zur Erzeugung von künstlichen Niederschlägen.....	10
4.1.1 Zusammenfassung	11
4.2 Apparate und Verfahren	12
4.2.1 Zusammenfassung	16
5 Hagelabwehr mit Silberjodid-Generatoren.....	17
5.1 Silberjodid-Generatoren.....	17
5.1.1 Zusammenfassung	21
5.2 Eigenschaften von Silberjodid	21
5.3 Herstellung von Silberjodid.....	23
5.3.1 Herstellung von Silberjodid aus AgNO_3 und Jodiden	23
5.3.2 Herstellung von Silberjodid aus Ag-Salzen und Jodiden.....	24
5.4 Löslichkeit von Silberjodid.....	24
5.4.1 Löslichkeit von Silberjodid in wässrigen Lösungen	24
5.4.2 Löslichkeit von Silberjodid in nicht wässrigen anorganischen Lösungen.....	25
5.4.3 Löslichkeit von Silberjodid in Keton-Wasser-Gemischen.....	25
5.5 Steigerung der Löslichkeit von Silberjodid in AgI-Komplexen.....	25
5.5.1 Die Messung der Effizienz im Labor und in realen Bedingungen	29
5.5.2 Wirksamkeit von AgI-Komplexen in Laborversuchen.....	31
5.5.3 AgI-Komplexe und die Effekte in Cumulonimbus Wolken zu unterschiedlichen Zeitpunkten	36
5.5.4 AgI-Komplexe und die Effekte in stratiformen Wolken.....	37

5.5.5	Agl-Komplexe und die Effekte bei Sturm.....	38
6	Diskussion	39
7	Ausblick.....	41
	Literaturverzeichnis.....	43
	Anhang.....	55

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Silberjodid-Generator an der Flugzeugtragfläche des Partenavia P68	3
Abbildung 2: Entstehung von Hagelkörnern aus unterkühlten Wassertropfen.....	6
Abbildung 3: Grafik zur vereinfachten Darstellung des Orts der Hagelentstehung.....	8
Abbildung 4: Originalaufnahme des Bodengenerators von Vonnegut .	12
Abbildung 5: Bodengenerator der Power Brüder zur Erzeugung von Silberjodid-Rauch	13
Abbildung 6: Bodengenerator seitliche Gesamtansicht	14
Abbildung 7: Ultraschall-Bodengenerator zur Erzeugung von Silberjodid-Nebel	15
Abbildung 8: Hagelkörner mit der jeweiligen kinetischen Energie in J/m ² über den Durchmesser von Hagelkörner aufgetragen	16
Abbildung 9: 1951 erfundene Silberjodid-Rauch-Apparatur in kompakter Form.....	17
Abbildung 10: Die Erzeugung von Silberjodid-Partikel durch Zündung von gepressten Silberjodid-Stäbe	18
Abbildung 11: Kompakte Apparatur mit Silberjodid-Partikel u. Aceton	19

Abbildung 12: Der noch heute in der Form verwendete Silberjodid-Brenner, angebracht an der Flugzeugtragfläche	20
Abbildung 13: Zustandsdiagramm von Silberjodid nach Tammam	22
Abbildung 14: Übersicht über die Mischverhältnisse von Silberjodid mit Kal u. Nal	26
Abbildung 15: Mischverhältnisse von AgI mit PETN und gebildete AgI Kristalle.....	27
Abbildung 16: Hexagonale und kubische Eiskristallformen von Silberjodid	28
Abbildung 17: Die Anzahl der erzeugten AgI – Kristalle bei unterschiedlichen Temperaturen	34
Abbildung 18: Durchmesser der Kristalle, die aus AgI-KI, (AgI) ₂ -KI und AgI bei verschiedenen Temperaturen entstehen	35
Abbildung 19: Darstellung der optimalen Flugbahn Richtung der Aufwindzonen	41
Abbildung 20: Überblick zur optimalen Wolkenimpfung.....	42

1 Einleitung

1947 begann Bernard Vonnegut vom General Electric Research Laboratories nach chemischen Substanzen zu suchen, die eine ähnliche Struktur wie Eiskristalle haben. In der Silberjodid Verbindung mit seiner hexagonalen Struktur fand er die Substanz, nach der er gesucht hatte. In Kältekammern konnte er die Fähigkeit von Silberjodid (AgI) bei Temperaturen kälter als $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ Eiskristalle zu erzeugen, bestätigen. Die Versuche in unterkühlten Wolken zeigten, wie einfach und kostengünstig das Wetter verändert werden kann. Damit war der Grundstein für die bis heute andauernden Versuche gelegt worden, künstliche Niederschläge in Form von Schnee, Hagel oder Regen zu erzeugen. Die wirtschaftliche Bedeutung dieser Entdeckung verdrängte nach dem Kalten Krieg die militärische Evidenz. In kriegesischen Auseinandersetzungen sah die USA nämlich Vorteile in dieser Technologie. Im gegenwärtigen Zeitpunkt ist das wirtschaftliche Interesse sehr groß. Besonders die Versicherungsgesellschaften finanzieren zum Teil Versuche, die Hagelschäden eindämmen können. Die Schäden, die durch Hagel entstehen sind nicht nur auf die Landwirtschaft zu begrenzen, sondern erstrecken sich auch auf mobile und immobile Wirtschaftsgüter wie Autos, Häuser und sonstige Gegenstände.

Nach 70 Jahre Forschung ist noch kein standardisiertes Vorgehen bei der Wolkenimpfung beschrieben worden. Diese Studienarbeit hat daher das Ziel, die Effizienz des Verfahrens mit Silberjodid-Brennern an Flugzeugtragflächen und die Effizienz von Silberjodid-Lösungen durch Zusammenfassung des bisherigen Kenntnisstands herauszufinden. Aus den Erkenntnissen zur Hagelentstehung und unter Beachtung der Grenzen der Wirksamkeit von Silberjodid in verschiedenen Temperaturbereichen, wird im letzten Kapitel der Versuch unternommen, ein standardisiertes Vorgehen bei der Ausbringung von Silberjodid in die Wolken abzuleiten. Damit die Arbeit hierbei nicht an Übersichtlichkeit verliert und eine standardisierte Methode abgeleitet werden kann, sind die erfolgversprechendsten Ergebnisse jeweils am Ende der Kapitel zusammengefasst.

Die Studienarbeit ist in sieben Kapitel untergliedert. Nach der Einleitung wird in Kapitel 2 zunächst der Verein Hagelabwehr Südwest e.V. vorgestellt. In Kapitel 3 werden die Grundlagen zur Hagelentstehung bearbeitet. Danach erfolgt in Kapitel 4 eine Abgrenzung zu anderen bisher bekannten Verfahren, Apparaten und Mittel zur Hagelabwehr. Schließlich werden in Kapitel 5 die Hagelabwehr mit Silberjodid-Generatoren, die Eigenschaften von Silberjodid und die Effizienz von Silberjodid bei der Niederschlagsbildung beschrieben. Eine kurze Diskussion wird in Kapitel 6 durchgeführt. In Kapitel 7 wird ein Ausblick zur weiteren Vorgehensweise gegeben.

Zum Thema Wirksamkeit von Silberjodid zur Hagelabwehr wurden rund 400 Quellenangaben gefunden. Daraus sind knapp 200 Literaturangaben bewertet und die wichtigsten 83 Literaturquellen für die Studienarbeit herangezogen worden. Die Fülle an Versuchsergebnissen zu diesem Thema macht eine Auswahl der Literaturquellen erforderlich. Im Anhang sind alle Quellenangaben, die zu diesem Thema verfügbar waren als Volldokument in einer CD-ROM als PDF-Datei einsehbar. Dokumente die zum Zeitpunkt der Anfertigung der Studienarbeit nicht verfügbar waren, sind als PDF-Datei in Form einer Auflistung und zusätzlich als RIS-Datei für die Nutzung im Literaturverwaltungsprogramm gespeichert.

2 Vorstellung des Vereins Hagelabwehr Südwest e.V.

Der Verein zur Hagelabwehr Südwest e.V. ist in den Landkreisen Tuttlingen und Schwarzwald-Baar tätig und hat sich zur Aufgabe gemacht, die Schäden durch Hagel in den Landkreisen zu reduzieren. Dafür arbeitet sie mit der Firma Schopf GmbH aus Gerlingen zusammen und beauftragt diese mit der Ausbringung von Silberjodid an Gewitterwolken. Die Firma Schopf GmbH fliegt dafür bis zu 30 Einsätze mit dem Partenavia P68.



Abbildung 1: Silberjodid-Generator an der Flugzeugtragfläche des Partenavia P68.^[1]

In Abbildung eins ist ein Silberjodid-Generator zu sehen, der an der Flugzeugtragfläche des Fluggeräts Partenavia P68 angebracht ist. An der Flamme tritt Silberjodid in stark erhitztem Zustand aus. Das Silberjodid liegt nach Angaben des Vereins Hagelabwehr Südwest e.V. in einer klaren Lösung

vor. Ein Datenblatt vom Hersteller war zum Zeitpunkt der Anfertigung der Studienarbeit noch nicht verfügbar. Daher werden in Kapitel fünf die unterschiedlichen Herstellungsverfahren und deren Wirkungsweise nacheinander aufgeführt.

2.1 Optimale Verfahrensbeschreibung der Hagelabwehr mit Flugzeugen

Die optimale Verfahrensweise nach der die Firma Schopf GmbH die Wolken anfliegt, müsste sich nach der von Battan und Kassander in 1960 beschriebenen Verfahren orientieren. Danach werden auf einer Höhe zwischen 5400 Metern und 6100 Metern die Wolken etwa 20 Minuten lang geimpft. Auf der angegebenen Höhe bei etwa -5 °C konnten durch Messungen Eiskristalle nachgewiesen werden. Um einen Niederschlag künstlich zu erzeugen, ist dieses Verfahren als Standard anerkannt.^[2] Die nachfolgenden Ausführungen zur Effizienz dieser Methode zeigen weitere Ergebnisse hierzu auf.

3 Die Hagelentstehung

Kenntnisse zur Hagelentstehung sind wichtig für die effektive Wolkenimpfung mit AgI-Partikeln.

Der Deutsche Wetterdienst beschreibt den Hagel als „Niederschlag in Form von Eiskugeln oder Eisklumpen mit einem Durchmesser von fünf bis 50 mm“.^[3] Hagelkörner entstehen aus Graupel und können durch Auf- und Abwinde in verschiedene Wolkenschichten getragen und damit über fünf mm wachsen.^[4]

Als Graupel werden die Eispartikel bezeichnet, die einen Durchmesser von zwei bis fünf mm haben. Eine Graupel entsteht aus unterkühlten Wassertropfen und Eiskristallen in den Wolken. Reynolds begründet die Entstehung von Eiskristallen mit der Sublimation der Partikel.^[5] Zu den unterkühlten Wassertropfen zählen alle Wassertropfen, die eine Temperatur von unter 0 °C haben und noch flüssig sind. Durch Auf- und Abwinde können Graupel ebenfalls zu größeren Klumpen anwachsen. Ab fünf mm werden diese Klumpen dann als Hagelkörner bezeichnet.

Die Graupelentstehung wurde von Pflaum und Pruppacher in einem Windtunnel untersucht und das Anwachsen der Graupel durch gefrorene Tropfen unter Variation der Bedingungen: Durchmesser der Tropfen, Temperatur, Menge an flüssigem Wasser und weiteren Variablen bestätigt.^[5] Auf ein ähnliches Ergebnis kommt Beheng.^[6] Mason hat dagegen auf 2 km Höhe Graupel bei -5°C und kleinere Eispartikel auf 1 km Höhe entdeckt.^[7] Takahashi und Mori haben Temperaturen für das Wachstum von Graupel in den Bereich -5 °C bis -33 °C bestimmt.^[8] Die Oberflächentemperatur von Eiskristallen konnte auf etwa -1 °C bestimmt werden.^[9] Dennoch ist die Beschreibung der Hagelbildung schwierig.^[10] Denn in der Wolke werden kleine Wassermengen in den Eiskristallen eingeschlossen ^[11] und bilden einen Wasserfilm auf der Oberfläche der Eiskristalle, die zu einem weiteren Anwachsen der Eiskristalle beiträgt.^[12] Ebenso fand Macklin und Ryan heraus, dass die Eiskristalle in Etappen wachsen. Bei minus zwei Grad Celsius findet die erste Phase der Eiskristallbildung statt. Ab einer Temperatur von minus fünf Grad Celsius verändert sich die Struktur der Eiskristalle und die zweite Wachstumsphase wird eingeleitet. Die Struktur der Eiskristalle zeigt dann

vermehrt Risse und unregelmäßige Formen auf, so dass Wassertropfen besser an der Oberfläche der Eiskristalle haften können.^[13]

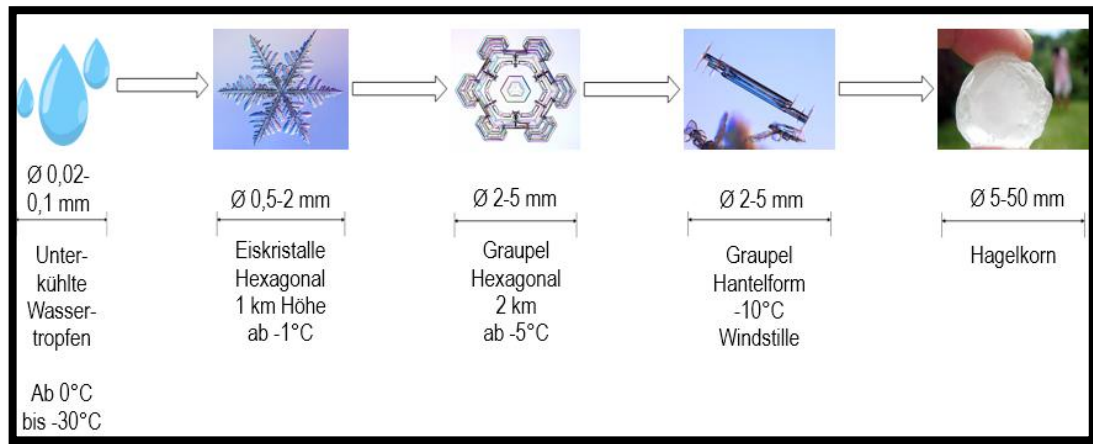


Abbildung 2: Entstehung von Hagelkörnern aus unterkühlten Wassertropfen.^[14]

Die Abbildung zwei zeigt bildhaft, die Entwicklungsstufen bei der Entstehung des Hagelkorns. In der ersten Stufe müssen unterkühlte Wassertropfen in den Wolken in flüssiger Form vorkommen. Die unterkühlten flüssigen Wassertropfen kommen in den Wolken bis zu Temperaturen von -30 °C vor. Entstehen in der zweiten Stufe Eiskristalle, so haben diese eine eher hexagonale Struktur. Eiskristalle sind in etwa ein Kilometer Höhe in den Wolken zu finden. Dabei sind die Eiskristalle dünn und haben einen maximalen Durchmesser von bis zu zwei Millimetern. In der nächsten Stufe sind die Eiskristalle zu sogenannten Graupel angewachsen. Graupel sind Eiskristalle mit einem Durchmesser zwischen zwei und fünf Millimetern. Sofern Windstille herrscht, verändert sich die Form der Graupel und es entstehen hantelförmige oder stäbchenförmige Eiskristalle. Auf dem letzten Bild und damit in der letzten Stufe ist ein Hagelkorn abgebildet.

3.1 Untersuchungen zur Hagelentstehung in Cumulonimbus Wolken

Hagelkörner können nur in Gewitterwolken entstehen. Größtenteils werden Cumulonimbus Wolken als Gewitterwolken bezeichnet.^[15] Teilweise können aber auch Schichtwolken (andere Bezeichnung für stratiforme Wolken) je nach Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Auf- und Abwinde Hagelkörner tragen. Das Vorhandensein von Eiskristallen in den Wolkenschichten ist hierbei die erste Voraussetzung zur Hagelbildung.

Das Vorkommen und die Konzentration von Eiskristallen wurden von Hobbs und Rangno in 90 Cumulonimbus und 72 Schichtwolken untersucht.^[16] In knapp der Hälfte der Wolken wurden Eiskristalle mit einer hohen Konzentration gefunden, die auch unterkühlte Wassertropfen mit einem Durchmesser von etwa 20 µm hatten. Andere gehen von einem Bereich 20 µm bis 100 µm aus.^[8] Bei -10 °C wird von einer Anzahl an Eiskristallen von 10^4 ausgegangen.^[17] Wird nun die Umgebungsluft in die oberen Wolkenschichten durch Aufwinde getragen, verstärkt sich die Eiskristallbildung. Für die Geschwindigkeit der auftretenden vertikalen Aufwinde hat Saunders durch Messungen ein Proportionalitätsverhältnis zwischen dem Durchmesser der Wolke (gemessen an der Unterseite der Wolke) und der Geschwindigkeit der Aufwinde von 0,4 ermittelt.^[18] Danach liegt die Geschwindigkeit der Aufwinde bei der Hagelentstehung zwischen 3 m/s und 4,6 m/s. Bestätigend dazu, unterteilt Cunnig die Wolken zusätzlich in drei Schichten auf und ermittelt so eine Geschwindigkeit von bis zu 5 m/s.^[19]

Das Wachstum der Cumulonimbus Wolke hängt aber auch vom Massendurchfluss der Aufwinde ab.^[20] Die Oberfläche der Eiskristalle schmilzt entlang der Aufwinde und gefriert erneut unter Vorhandensein von unterkühlten Wassertropfen. Eiskristalle können so weiter wachsen.^[21] Befinden sich Wassertropfen mit einem Durchmesser von etwa 30 µm in Cumulonimbus Wolken, deren obere Schichten nicht unterkühlt sind, können diese nicht mehr zum Abregnen gebracht werden.^[22] Ob eine Cumulonimbus Wolke mit größerem Niederschlag oder geringeren Menge zum Abregnen gebracht werden kann, hängt von der Höhe, dem Durchmesser und damit auch von den Aufwinden der Wolke ab.^[13]

Das Geographic Institute of the Academic Sinica hat zur Ermittlung der Frequenz von Hagelstürmen einen Apparat gebaut und eine mittlere Spitzenfrequenz von 100 Hz gemessen. Die Frequenz von Gewitter konnte auf 160 Hz festgelegt werden.^[23] Die Wachstumsrate einer Gewitterwolke wird durch die nachfolgende Formel (1)^[24] beschrieben.

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\pi * d^2 * u T}{4} * (Xl * El + Xi * Ei) \quad (1)$$

Dabei ist d der Durchmesser eines Hagelkorns, u_T seine Fallgeschwindigkeit, X_l und X_i sind die Konzentrationen an flüssigem Wasserdampf und Eis in den Wolken und E_l sowie E_i sind die Wirkungsgrade für flüssigen Wasserdampf und Eis in der Wolke. Für E_l wird die Zahl eins gesetzt, wenn Eiskristalle, Graupel und Hagel einen Durchmesser von mindestens 200 μm haben.^[24]

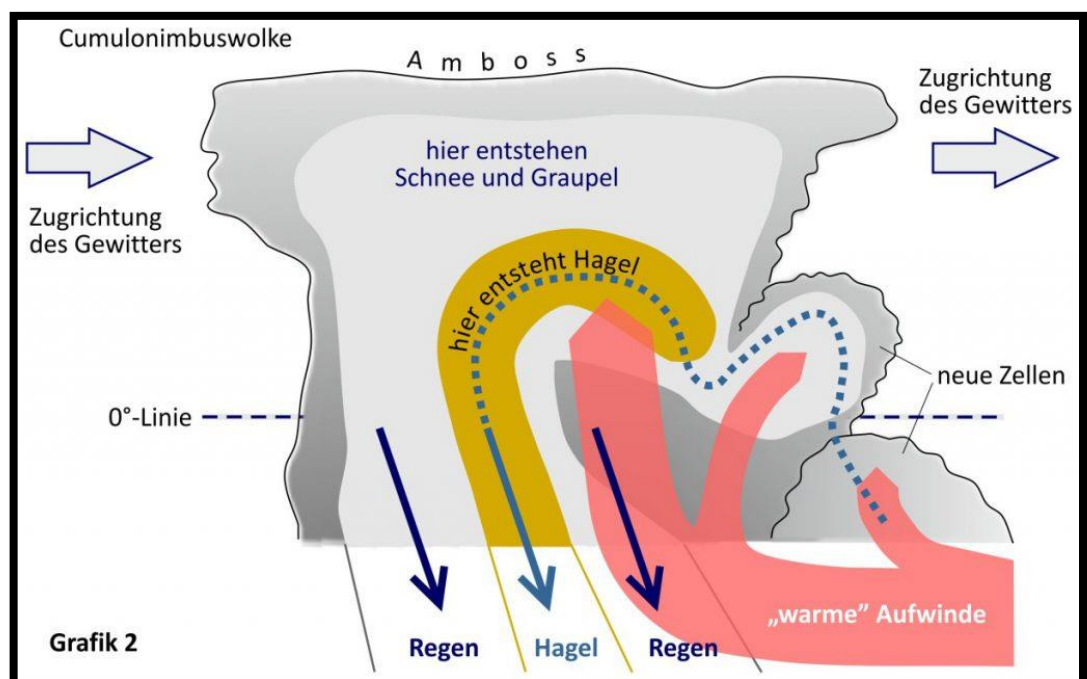


Abbildung 3: Grafik zur vereinfachten Darstellung des Orts der Hagelentstehung.^[25]

Abbildung drei zeigt bildhaft den Entstehungsbereich von Hagelkörnern in einer Cumulonimbuswolke. Durch Auf- und Abwinde können im Verlauf der gestrichelten Linie von rechts nach links die Eiskristalle in Phasen wachsen. In dem Schaubild ist horizontal eine gestrichelte Null Grad Linie zu sehen. Die Linie teilt die Wolke in zwei Bereiche ein. Der obere Bereich soll das wahrscheinliche Vorkommen von Graupel und Schnee deutlich machen.

3.2 Zusammenfassung

In neu entstehenden Wolken befinden sich Wassertropfen mit einer durchschnittlichen Größe zwischen 10 μm und 20 μm .^[24] Unterkühlte Wassertropfen mit einer Temperatur ab null Grad Celsius, wie sie in entstehenden Gewitterwolken vorkommen, weisen eine durchschnittliche Größe von mindestens 20 μm bis zu 100 μm auf. Kleinere Eiskristalle entstehen in Wolken, sobald die Wassertropfen einen Durchmesser von 30 μm erreicht haben und Temperaturen ab minus fünf Grad Celsius herrschen. Bei Aufwindgeschwindigkeiten zwischen drei und fünf Metern pro Sekunde in Cumulonimbuswolken entstehen Hagelkörner. Es kann davon ausgegangen werden, dass je größer d.h. breiter die Cumulonimbus Wolke ist, umso höher sind die Aufwindgeschwindigkeiten und die Größe der Hagelkörner.

4 Abgrenzung zu anderen Verfahrensarten und Lösungen

In den 70 Jahren Forschung haben sich verschiedene Herstellungsmethoden von AgI und Verfahrensweisen entwickelt. Der Hagelfliegerverein Südwest e.V. wendet die Methode der Wolkenimpfung mit der Ausbringung von Silberjodid aus Silberjodid-Generatoren an, die an den Flugzeugtragflächen angebracht sind. Der nachfolgende Text soll einen Überblick über die bisher untersuchten Lösungsmittel und Methoden geben, um die Effektivität von Silberjodid als geeignetes Mittel zur Wolkenimpfung aufzuzeigen, die es im Vergleich hat.

4.1 Weitere Mittel zur Erzeugung von künstlichen Niederschlägen

Die aufgeführten Versuchsergebnisse zeigen alle Mittel und Methoden zur Erzeugung von künstlichen Niederschlägen von den Anfängen in den 1960er Jahren bis zu den neuesten Ergebnissen in 2016.

Die Anwendung von unterschiedlichen Salzen wie Natriumchlorid (NaCl), Kaliumchlorid (KCl), Magnesiumsulfat (MgSO_4) etc. wurden in 1961 untersucht und mit Silberjodid verglichen. Hoffer stellte die Eiskristallbildung der verwendeten Salze bei etwa $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ fest.^[26] Versuche mit Kupfer als Eiskristallbildner, hat er im Jahr darauf mit weniger erfolgversprechendem Ergebnis untersucht.^[27] Garvey beschreibt in 1973 die Effizienz des Verfahrens mit Versuchen in einer Kältekammer. Dafür verwendet er eine AgI- NH_4I -Lösung in einem Bodengenerator.^[28] Laut Garvey hat der AgI- NH_4I -Komplex die höchste Eiskeimbildungsfähigkeit. Damit ist die Verwendung von AgI- NH_4I ab minus fünf Grad Celsius bis $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ effektiver, als die Lösung AgI-NaI, die erst bei etwa $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ eine optimale Eiskeimbildung aufweist.^[17; 29] Langer, Cooper und Rosinski haben 1978 die Eisbildungsfähigkeit von monodispersen Silberjodid Partikeln mit einem Durchmesser von $0,01\text{ }\mu\text{m}$ bis $0,12\text{ }\mu\text{m}$, von einer AgI-NaI-Lösung, von 1,5-Dihydroxynaphthalen und von Phloroglucinol getestet.^[30] Danach hängt die Effektivität der AgI-NaI-Lösung von der Partikelgröße ab. Sie zeigt innerhalb der Grenzen von $0,01\text{ }\mu\text{m}$ bis $0,12\text{ }\mu\text{m}$ Durchmesser eine optimale Eiskeimbildungsfähigkeit unter der Grenzbetrachtung des Temperaturbereichs zwischen $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.^[30] In

Russland wurde von 1951 bis 1965 Raketen zur Hagelabwehr getestet. Die Raketen sprengten die Silberjodid-Lösung in einer Kapsel direkt an der Wolke und waren sehr effektiv.^[23] Die Effektivität zur Eiskristallbildung von 1,5-Dihydroxynaphtalen und der AgI-NaI-Aceton Lösung wurde mittels einer Überschalldüse von Fukuta und Paik getestet.^[31; 32] Hierbei ist die bessere Aktivität von 1,5 dihydroxynaphtalen im Vergleich zu der AgI-NaI-Aceton Lösung nachgewiesen worden. Die bessere Eiskeimbildungsfähigkeit wurde mit dem angewendeten Verfahren, nämlich der schnellen Expansionsmöglichkeit der Partikel mit der Überschalldüse begründet.^[32]

Die Trichlorbenzene, Melamine, die Raffinose und die Trimesinsäure konnten eine Wirkung bei -15 °C und das Phloroglucinol bei -2 °C Eiskristalle erzeugen.^[33; 34; 35] Als eine weitere Möglichkeit zur Hagelabwehr wurde die Trockeneis – Methode bekannt.^[36; 37] Am Institute for Atmospheric Sciences wurde in 1984 jedoch die Eiskeimbildung von Trockeneis und Silberjodid miteinander verglichen und dabei festgestellt, dass das Trockeneis nicht effektiver ist als die Verwendung von Silberjodid.^[38] Als eine vielversprechende Methode ist die Verwendung von Silberjodid in Verbindung mit Kohlenstoffdioxid zu erwähnen, die an der Chinese Academy of Science mittels einer numerischen Simulation gefunden wurde.^[39; 40] Die Versuche mit Natriumchlorid zur Hagelabwehr wurden in Russland in 2007 mit einer Rakete unternommen. Dabei konnte der Durchmesser der Wassertropfen die künstlich erzeugt wurden auf 20 µm bis 30 µm vergrößert werden.^[41] Die Ausbringung einer Dispersion aus Silberjodid Nanopartikeln und Carbon ist die neueste in 2016 in Maryland/USA gefundene Methode, Regen oder Schnee zu erzeugen.^[42; 43]

4.1.1 Zusammenfassung

Als effizientes Mittel zur Erzeugung von Niederschlägen sind die Komplexbildner AgI-AgI-Wasser-Aceton Gemisch, AgI-NH₄I-Wasser-Aceton Lösung und die AgI-NaI-Wasser-Aceton Lösung zu erwähnen. Diese kommen mit ihren Beta-Kristallstrukturen denen der Eiskristalle sehr nahe. Die Dispersion von Silberjodid Nanopartikeln und Carbon ist zuletzt in 2016 im Laborversuch als effizientes Mittel zur Erzeugung einer eiskristallähnlichen

Struktur gefunden worden. Allen bisher verwendeten Mittel konnte die Eiskristallbildungsfähigkeit nachgewiesen werden. Dabei sind die hygroskopische Wirkung, die erzeugte Kristallstruktur sowie die Partikelgröße mit einer hohen spezifischen Oberfläche als Gründe für die Fähigkeit zur Eiskristallbildung herangezogen worden. Mit der Verwendung einer Überschalldüse durch die die Lösung gesprüht wird, entstehen kleinere Partikel mit einer effizienteren Eiskeimbildungsfähigkeit.

4.2 Apparate und Verfahren

Ein etwas älteres Verfahren, um die Wolken mit Silberjodid zu impfen, ist die Verwendung von Generatoren, die vom Boden aus betrieben werden. Als eines der ersten Bodengeneratoren ist die von Vonnegut zu erwähnen.

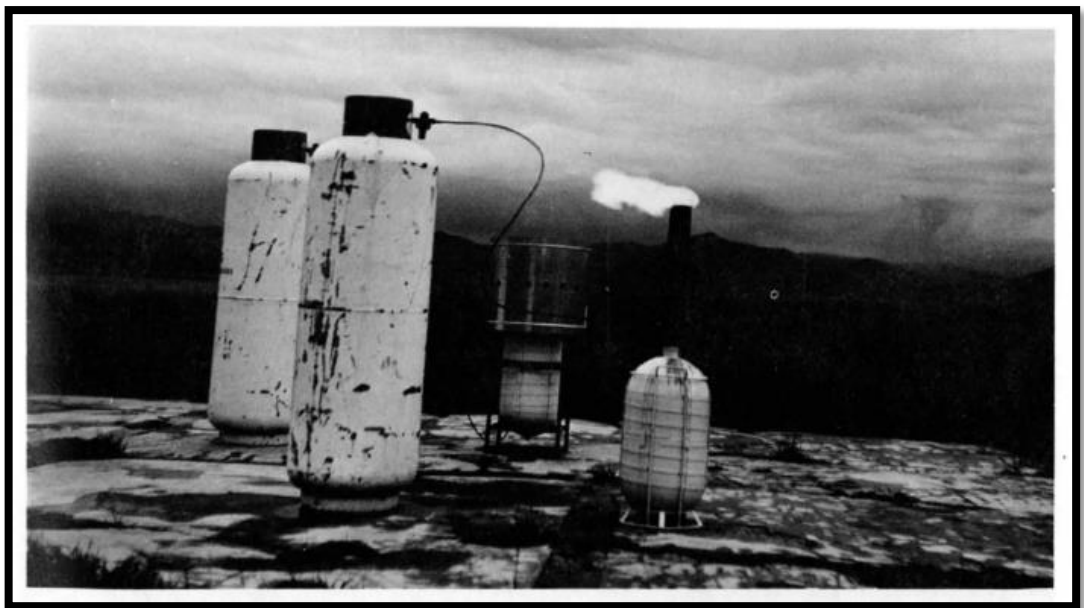


Abbildung 4: Originalaufnahme des Bodengenerators von Vonnegut.^[24]

In Abbildung vier ist ein Bodengenerator im Betriebszustand zu sehen.^[24] Das Silberjodid wird vorliegend mit Propangas versetzt und tritt mit der Flamme aus. Die Partikel können mit dem Wind in die Wolken getragen werden.

Robert und Bernard Power haben die zweite Generation von Bodengeneratoren in 1967 entwickelt, bei der ein Seil mit imprägniertem Silberjodid verbrannt wurde, um Silberjodid-Rauch zu erzeugen.^[44]

Die Abbildung fünf zeigt eine Originalaufnahme des Apparates in Betrieb.



Abbildung 5: Bodengenerator der Power Brüder zur Erzeugung von Silberjodid-Rauch.^[24]

In Abbildung sechs ist ein älterer Bodengenerator in der Seitenansicht zu sehen. Darin wird das Funktionsprinzip der Raucherzeugung sichtbar. Das mit Silberjodid imprägnierte Seil wird kontinuierlich in der Kammer verbrannt. Die imprägnierte Substanz (Silberjodid) verbrennt dabei mit und es entsteht Silberjodid-Rauch.

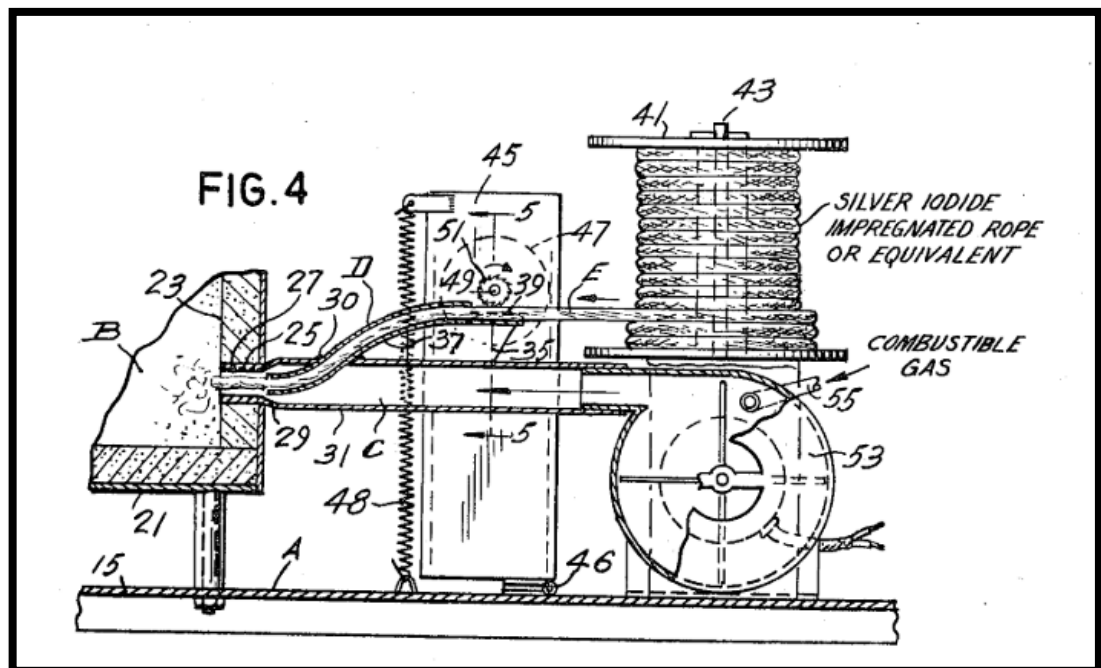


Abbildung 6: Bodengenerator seitliche Gesamtansicht.^[44]

Eine weitere Möglichkeit in Bodengeneratoren Silberjodid-Nebel zu erzeugen wird in der Abbildung sieben veranschaulicht. Die Abbildung zeigt einen Ultraschall - Bodengenerator von Amand und Koff aus dem Jahre 1974 zur Erzeugung von Silberjodid-Nebel.^[45]

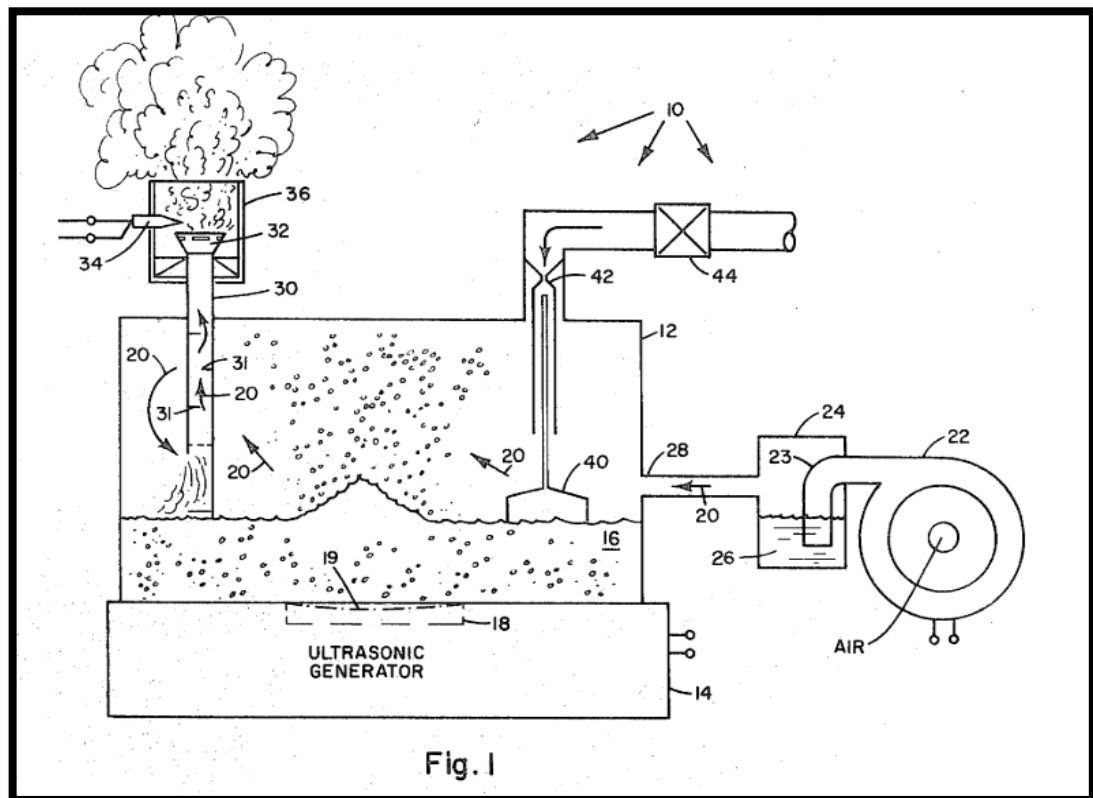


Abbildung 7: Ultraschall-Bodengenerator zur Erzeugung von Silberjodid-Nebel.^[45]

Mit einem Ultraschall (Nr.18) werden die Silberjodid-Partikel (Nr.19) unter Zufuhr von heißem Dampf (Nr. 23, 24, 26, 20) verteilt.

4.2.1 Zusammenfassung

Die Untersuchungen in Frankreich und Spanien haben gezeigt, dass der Betrieb der Bodengeneratoren zur richtigen Zeit mit der effizienten Ausbringungsmenge an Silberjodid von 11 g, die Größe der Hagelkörner reduziert. Um die Energie und Größe der Hagelkörner zu messen, wurden insgesamt 100 Platten mit jeweils fünf Kilometer Abstand über das gesamte Gebiet verteilt. Die Abbildung acht zeigt die Ergebnisse der Untersuchung. Dabei ist deutlich an der blauen Linie zu erkennen, dass durch die geringere Ausbringungsmenge von 11 g deutlich kleinere Hagelkörner entstehen als bei einer Ausbringungsmenge von 121 g.^[46] Demnach ist der Betrieb von Bodengeneratoren zur Wolkenimpfung effektiv.

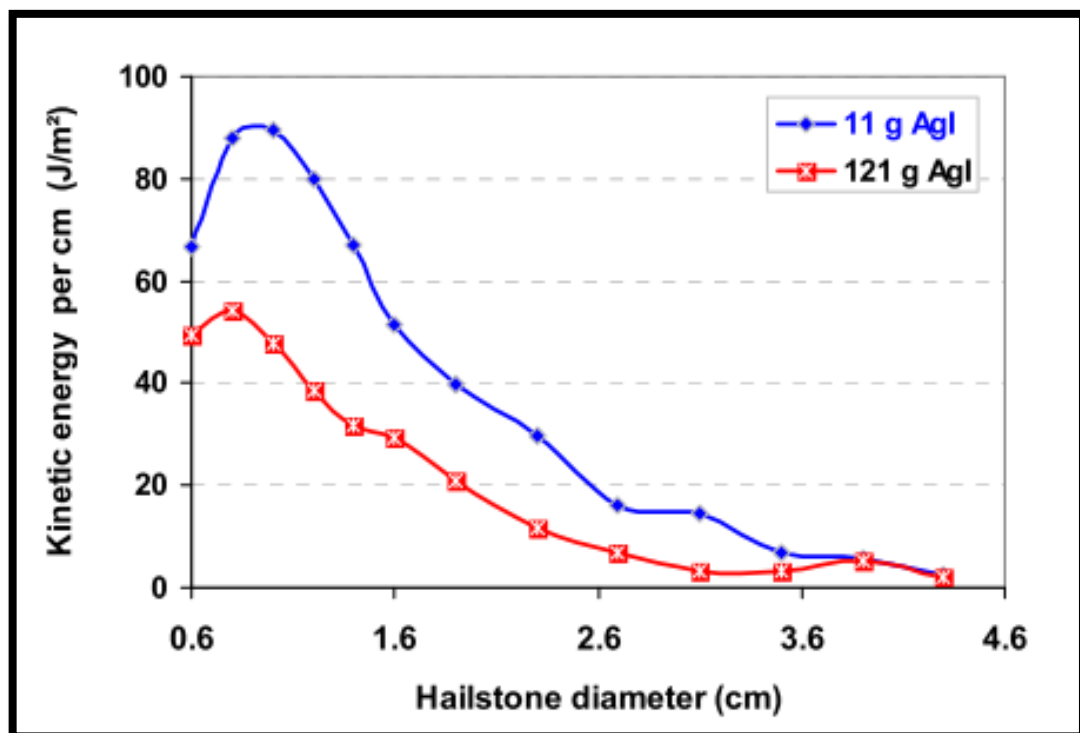


Abbildung 8: Hagelkörner mit der jeweiligen kinetischen Energie in J/m^2 über den Durchmesser von Hagelkörner aufgetragen.^[46]

5 Hagelabwehr mit Silberjodid-Generatoren

Die Hagelabwehr mit Silberjodid-Generatoren wird derzeit als gängige Methode angewendet, um künstlich Niederschläge zu erzeugen.

5.1 Silberjodid-Generatoren

Der erste Apparat wurde in 1951 patentiert. Damit kann Silberjodid-Rauch erzeugt und in kompakter Ausführung auch an Flugzeugen angebracht werden.^[47] Abbildung neun zeigt die Ausführung.

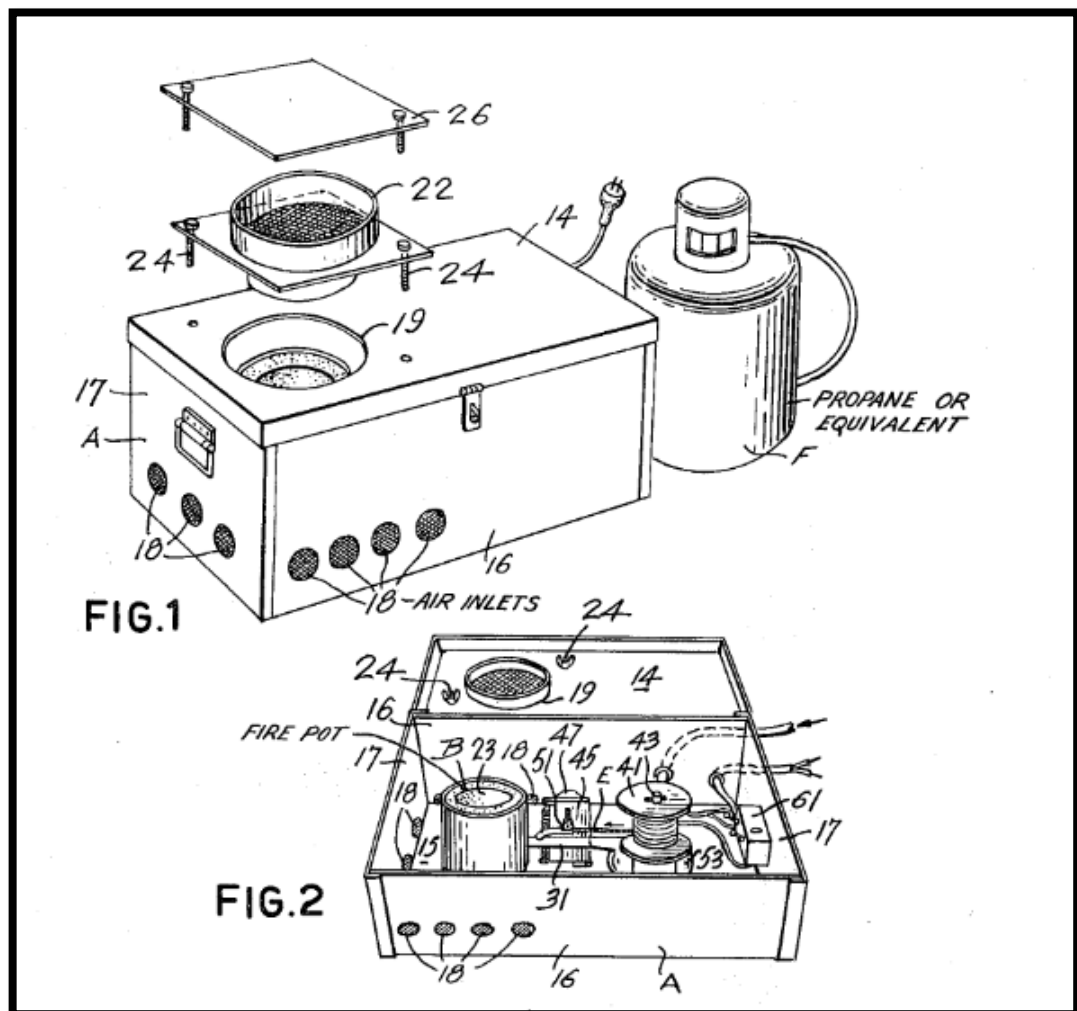


Abbildung 9: 1951 erfundene Silberjodid-Rauch-Apparatur in kompakter Form.^[47]

Eine Verbesserung der Apparatur findet sich in 1956 und ist in Abbildung 10 zu sehen. Die Erfindung veränderte die Methode der Silberjodid-Raucherzeugung. Hier liegt die maßgebliche Erneuerung in der Verwendung von gepressten Silberjodid-Stäben als Zündvorrichtung.

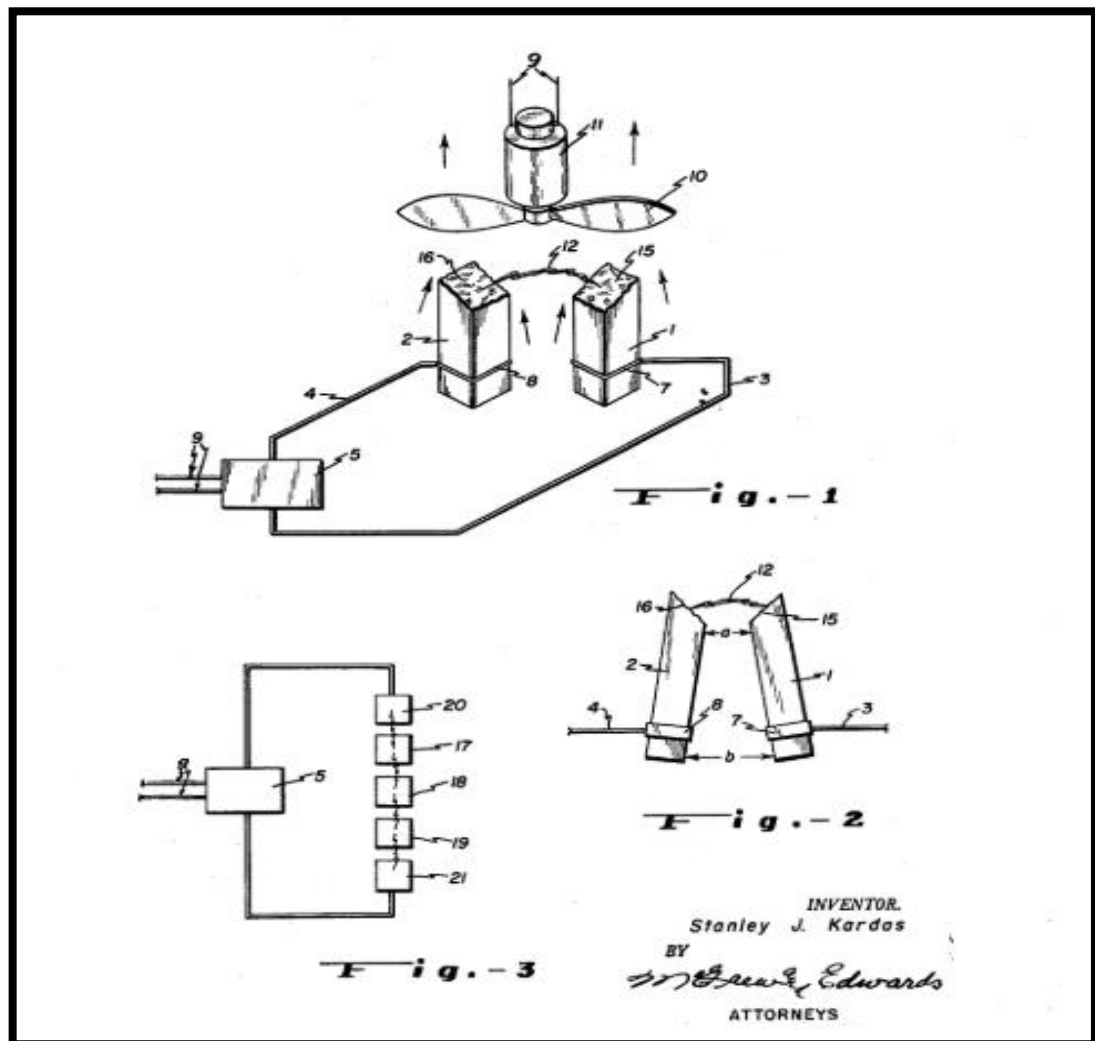


Abbildung 10: Die Erzeugung von Silberjodid-Partikel durch Zündung von gepressten Silberjodid-Stäbe.^[48]

Durch die elektrische Zündung der beiden Stäbe (Nr. 15, 16) werden kleinste Mengen an Silberjodid-Partikel freigesetzt. In Verbindung mit einem Ventilator (Nr. 10, 11), der die Partikel in der Luft zerstäubt, ist die Erfindung optimal für den Betrieb von mehreren dieser parallel geschalteten Stäbe.^[48] 1968

erfanden die Brüder Power die Zerstäubung der Silberjodid-Partikel durch Verbrennung der Aceton Lösung. In Abbildung 11 ist die Erfindung in kompakter Ausführung zu sehen. Damit ist die Apparatur im Vergleich zum Apparat von Vonnegut und Schäfer geeigneter zur Anbringung an Flugzeugtragflächen.^[49]

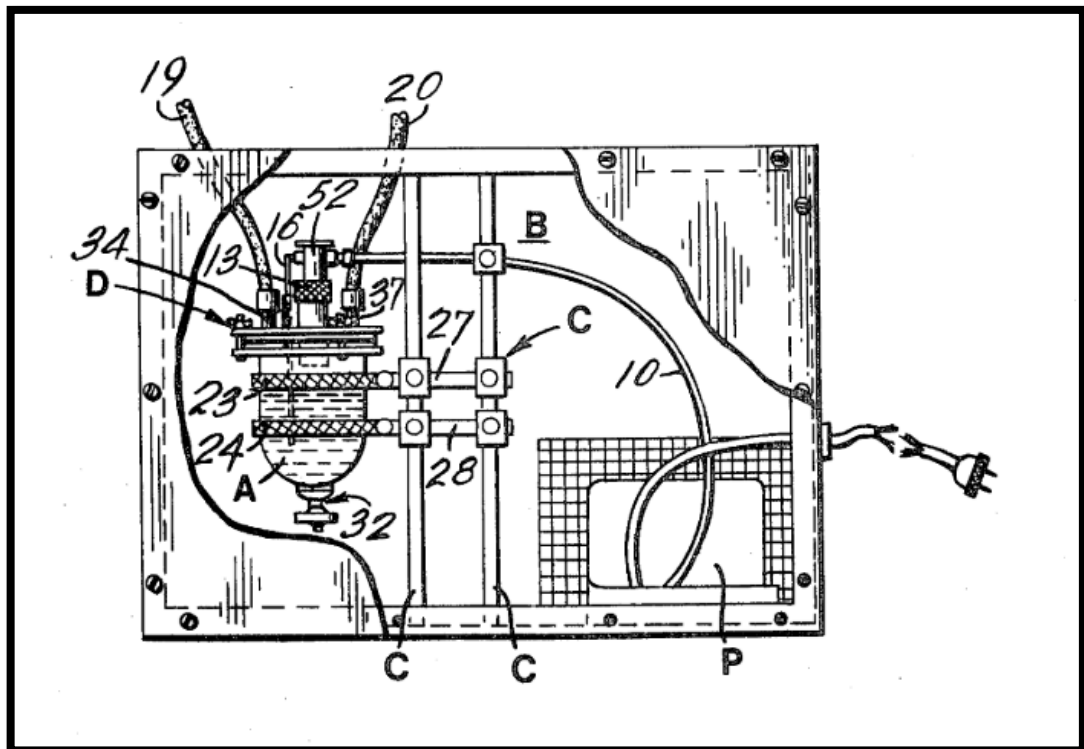


Abbildung 11: Kompakte Apparatur mit Silberjodid-Partikel und Aceton.^[49]

Die Kammer (A) enthält Aceton und Silberjodid-Partikel die über eine Zündvorrichtung (Nr.19, 20) gezündet und Silberjodid-Rauch freigesetzt wird (Nr. 52).

Die fünf unterschiedlichen Silberjodid-Brenner hat König 1963 untersucht. Er konnte nachweisen, dass an die Oberfläche der Silberjodid-Partikel aufgrund der Verbrennung unterkühlte Wassertropfen schneller anhaften und Eiskristalle bilden können, als die Ausbringung von Silberjodid-Partikel als Pulver oder mit der Zerstäubung als Aerosol.^[50]

Lohse patentierte 1964 die noch heute verwendete Apparatur, in Abbildung 12 veranschaulicht, zur Impfung der Wolken.^[51]

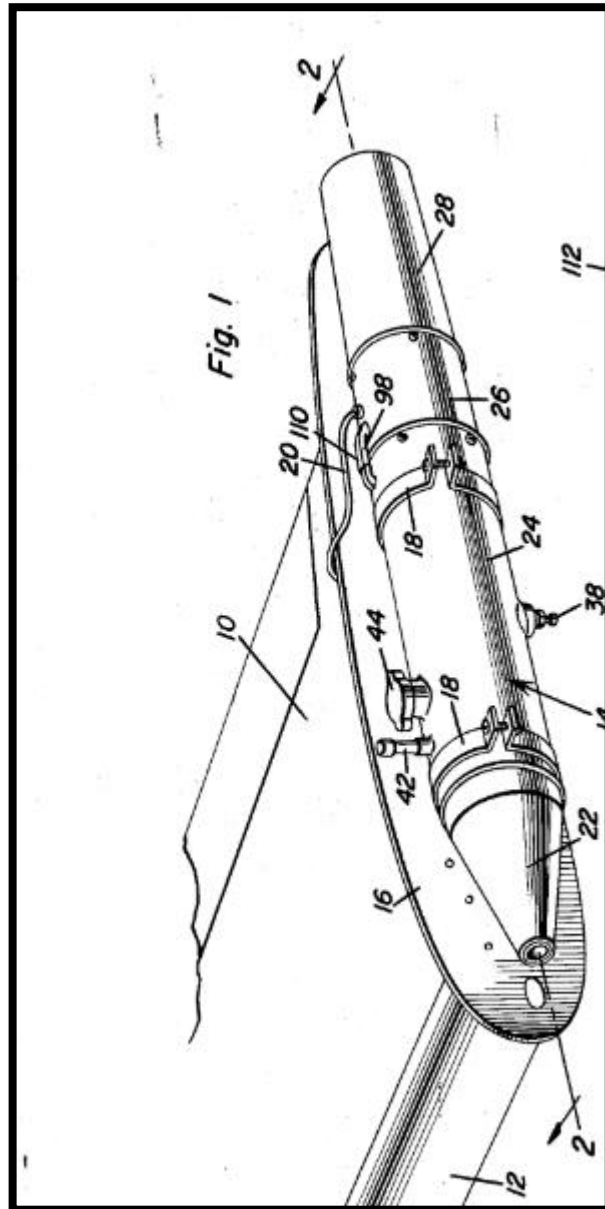


Abbildung 12: Der noch heute in der Form verwendete Silberjodid-Brenner, angebracht an der Flugzeugtragfläche.^[51]

Bei gleicher Bauweise aber mit einem verbesserten Zündungsverhalten hat Merrill 1967 ein Patent angemeldet. Der Vorteil liegt bei der Erfindung daran, dass noch kleinere Silberjodid-Partikeln bei der Verbrennung erzeugt werden können.^[52]

5.1.1 Zusammenfassung

Die letztgenannten Silberjodid-Generatoren werden derzeit zur Hagelabwehr an Flugzeugtragflächen angebracht und eingesetzt. Jedes der aufgeführten Generatoren ist geeignet dazu, eine effiziente Menge an Silberjodid auszubringen.

5.2 Eigenschaften von Silberjodid

Silberjodid hat eine Schmelztemperatur von etwa 555 °C und eine Siedetemperatur von 1506 °C.

Es kommt unter Normaldruck in drei unterschiedlichen Formen vor. Die alpha-Agl-Kristalle sind kubisch-raumzentriert, das beta-Agl-Kristall hat eine hexagonale Struktur und das gamma-Agl-Kristall ist kubisch-flächenzentriert.^[53] Je nach Herstellungsmethode entstehen vermehrt hexagonale Agl-Kristalle oder vermehrt alpha- bzw. gamma-Agl-Kristalle. Vonnegut leitet aus der hexagonalen Struktur von Silberjodid dessen Effizienz bei der Hagelabwehr ab. Ziel bei der Suche nach dem geeigneten Wolkenimpfmittel ist es deshalb, eine hexagonale Agl-Kristallstruktur zu erzeugen. In der Natur kommt die hexagonale Phase als Jodargyrit vor. Gmelin hat übersichtlich die unterschiedlichen Verfahrensweisen aufgelistet.^[53]

Hexagonale Silberjodid-Kristalle können aus Silberjodid-Pulver und unter thermischer Einwirkung hergestellt werden. Dafür wird das Pulver einfach bis 100 °C erhitzt und langsam abgekühlt. Ist das Pulver grobkörnig, erfolgt die Umwandlung bereits bei 55 °C. Bei Temperaturen über 147 °C findet jedoch die Umwandlung in alpha-Agl-Kristallen.

Das Zustandsdiagramm von AgI wird in Abbildung 13 gezeigt. In der Literatur herrschen unterschiedliche Auffassungen über den Tripelpunkt. Die widersprüchlichen Untersuchungsergebnisse erschweren die übersichtliche Datenaufbereitung. Das Diagramm gibt aber einen ersten Anhaltspunkt über die Schmelztemperatur von Silberjodid. Diese stimmen nämlich mit anderen Untersuchungen überein. Der Tripelpunkt der Phasen alpha-/beta-/gamma-Kristallen liegt in dem Zustandsdiagramm bei 85 °C und drei Kilo bar. Nachfolgende Untersuchungen setzen den Tripelpunkt auf 30 °C.^[53]

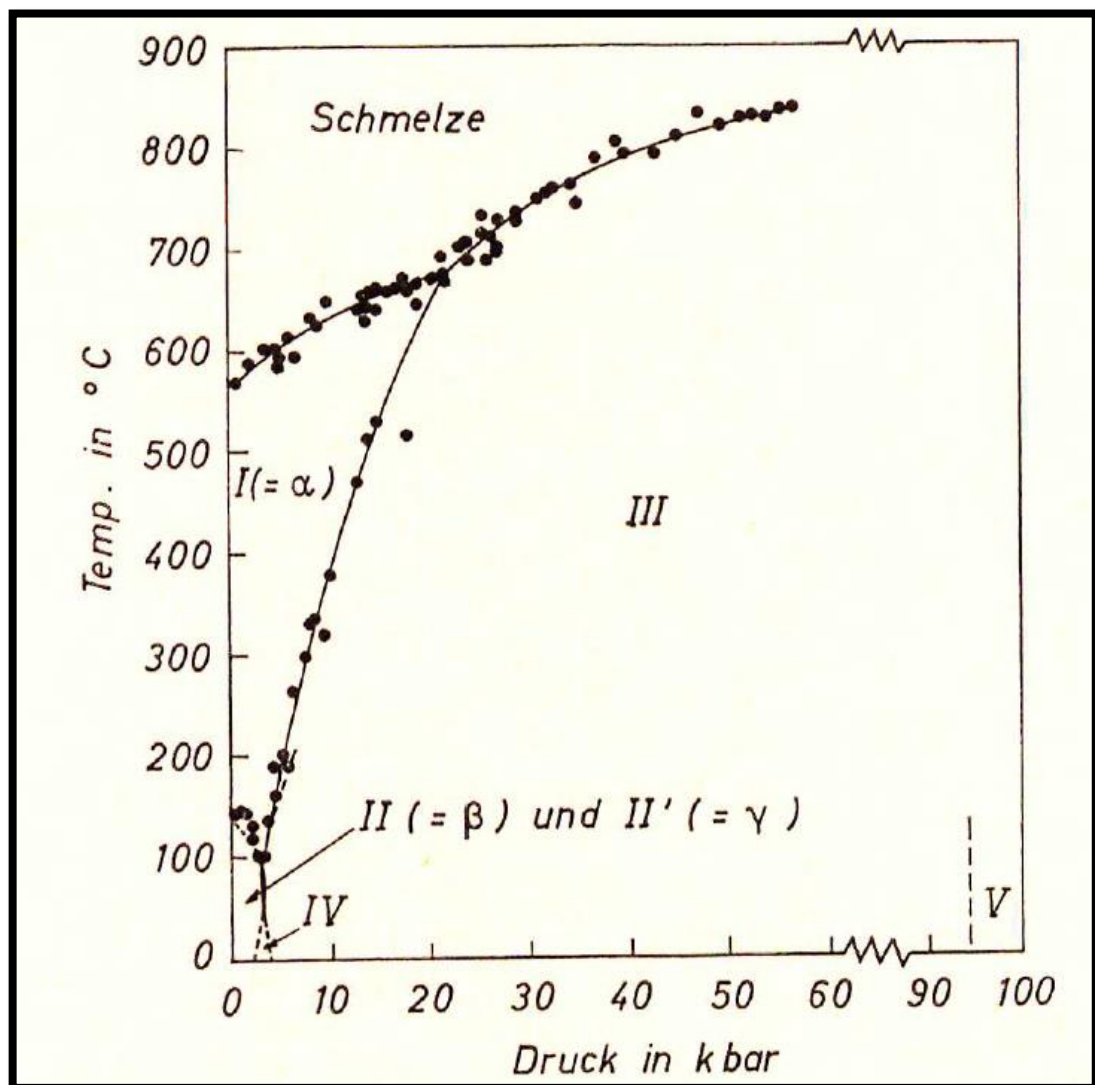


Abbildung 13: Zustandsdiagramm von Silberjodid nach Tammam.^[53]

Die unterschiedlichen Strukturen der Silberjodid-Kristalle können auch farblich deutlich gemacht werden. Silberjodid, das aus Lösungen gefällt wurde, hat eine blass-gelbe Farbe, wenn hexagonale Silberjodid-Kristalle entstanden sind. Bei überschüssigen J^- - Ionen ist die Farbe heller und bei überschüssigen Ag^+ - Ionen wechselt die Farbe zu orange. Bei überschüssigen Ag^+ - Ionen entstehen eher kubische Kristallstrukturen. Mit steigender Temperatur wird die Farbe von Orange kräftiger und die Kristalle haben eine rötliche Farbe. Bei niedrigeren Temperaturen wird die Farbe heller.

5.3 Herstellung von Silberjodid

Silberjodid ist ein Gemisch aus den beiden Elementen Silber und Jod. Zum Zeitpunkt der Erstellung der Studienarbeit lag kein Datenblatt des Herstellers vor. Daher werden einige Herstellungsmethoden und die Eigenschaften von Silberjodid anhand der Literaturquellen aufgeführt.

5.3.1 Herstellung von Silberjodid aus AgNO_3 und Jodiden

Eine sehr schnelle und leichte Form AgI-Kristalle zu erzeugen ist die Fällung von AgI durch Zusatz von 35,3 g AgNO_3 in 39,7 g Kaliumjodid, die jeweils in der 10 fachen Menge in Wasser gelöst sind. Die Fällung erfolgt bei 0 °C unter ständigem Rühren. Durch Fällung mit quartzdestilliertem Wasser in rotem Dunkelkammerlicht werden reinere AgI Kristalle gewonnen.^[53] Nach Absetzen des Niederschlags wird mit Eiswasser gewaschen und mit Aceton dekantiert. Das gebildete KNO_3 wird während der Wässerung entfernt. Die gewonnene Verbindung wird nochmals gewaschen und im Vakuum von Wasser befreit. Anschließend wird nochmals mit Aceton nachgewaschen. Die Trocknung erfolgt danach etwa 10 bis 12 Stunden bei etwa 110 °C. Die Lichtempfindlichkeit wird durch Zugabe von Kaliumjodid in geringem Überschuss vermindert. Hierdurch entstehen vermehrt hexagonale AgI-Kristalle.

AgI lässt sich auch aus AgNO_3 und NaI in geringem Überschuss gewinnen. Dafür wird nach der Fällung der Niederschlag mit heißem Wasser gewaschen und im Vakuum bei 80 °C getrocknet.

Bei diesem Herstellungsverfahren entsteht eine hexagonale Struktur immer dann, wenn beim Fällern von AgI, überschüssige J⁻ Ionen in den Lösungen vorhanden sind.^[53]

5.3.2 Herstellung von Silberjodid aus Ag-Salzen und Jodiden

Das Silberjodid kann auch aus Ag-Salzen und Jodiden hergestellt werden. Durch Schütteln einer wässrigen Suspension von AgN₃ mit (CH₃)₄NJ entsteht AgI und [(CH₃)₄N]N₃.

Weiterhin kann beispielsweise AgI hergestellt werden, indem drei Minuten lang $8 \cdot 10^{-4}$ Mol AgBr mit einer zwei Milliliter speziellen Kaliumjodid-Lösung gemischt und gerührt wird. Die Kaliumjodid-Lösung wird durch Zusatz von 8,3 g Kaliumjodid in 100 ml einer 0,4 Molaren NH₃ Lösung erhalten.^[53]

5.4 Löslichkeit von Silberjodid

Nach Angaben des Hagelfliegervereins liegt das Silberjodid in einer klaren Lösung vor. Daher ist die Löslichkeit in wässrigen sowie in nicht wässrigen anorganischen Lösungen zu untersuchen.

5.4.1 Löslichkeit von Silberjodid in wässrigen Lösungen

Silberjodid ist das schwerstlöslichste der Ag-Halogenide in Wasser. Bei 18 °C bzw. 20 °C löst sich Silberjodid mit $5,74 \cdot 10^{-9} \frac{\text{mol}}{\text{l}}$ bzw. $6,7 \cdot 10^{-9} \frac{\text{mol}}{\text{l}}$ in Wasser auf. Die Löslichkeit von AgI kann in einer NH₃-Lösung gesteigert werden.

In der wässrigen 10 %igen NH₃-Lösung, löst sich AgI mit 0,035 g pro Liter NH₃-Lösung. In einer 7 %igen NH₃-Lösung und jeweils 16 °C löst sich AgI mit 0,045 Gramm pro Liter in der NH₃-Lösung und in einer 20 %igen NH₃-Lösung löst sich AgI mit 0,166 g pro Liter.^[53] Zu beachten ist jedoch das Abscheiden von metallischem Silber bei längerer Lagerdauer. Die Abscheidung kann jedoch durch Zusetzen von NH₄J verhindert werden.

5.4.2 Löslichkeit von Silberjodid in nicht wässrigen anorganischen Lösungen

In flüssigem Ammoniak löst sich Silberjodid bei -33 °C mit 167 g AgI pro Liter Lösung und bei 25 °C steigt die Löslichkeit auf 206,84 g AgI pro Liter Lösung.^[53]

In Salzschnmelzen sowie in Fluorwasserstoffen ist keine Löslichkeit gegeben.

5.4.3 Löslichkeit von Silberjodid in Keton-Wasser-Gemischen

In Aceton – Wasser – Gemischen mit Natriumjodid oder Kaliumjodid Zusätzen steigt die Löslichkeit von AgI mit der Aceton Konzentration bei 25 °C stark an. Beispielsweise löst sich 1,235 g AgI pro 100 g einer Lösung, die 0,272 g Natriumjodid pro 100 g Aceton enthält. Wird die Konzentration von Natriumjodid auf 1,91 g pro 100 g Aceton erhöht, steigt die Löslichkeit von AgI auf 8,034 g pro 100 g der Lösung. Ebenso steigt die Löslichkeit von AgI in einer Kaliumjodid-Aceton-Lösung stark an, je höher die Konzentration an Kaliumjodid pro 100 g Aceton ist. Die Löslichkeit von AgI liegt bei 5,020 g pro Liter einer Kaliumjodid-Aceton-Lösung mit 1,27 g Kaliumjodid pro 100 g Aceton.^[53]

5.5 Steigerung der Löslichkeit von Silberjodid in AgI-Komplexen

Die Löslichkeit von Silberjodid in AgI-Komplexen könnte gesteigert werden. Dafür müssten aber auch hexagonale Kristalle gebildet werden, um effektiv Niederschläge bilden zu können. Daher werden hier die Löslichkeit und die Eigenschaften der Komplexbildner von AgI mit anderen Substanzen aufgeführt, die bisher in der Literatur untersucht wurden. „Es ist bekannt, dass sich Silberhalogenide durch Zufügen von überschüssigen Halogenid Ionen in wasserlösliche Komplexe überführen lassen. Als Beispiele werden Komplexe von AgI mit AgCl_6^- , AgCl_{43}^- , AgBr_{32}^- , AgBr_{54}^- , AgJ_2 , AgJ_{43}^- , AgC_{13}Br und AgClBr_{33}^- genannt. Die Komplexe müssten danach aber auch aufgelöst bzw. zerstört werden können.“^[53] Als Verdünnungsmittel wird meist Wasser verwendet, die noch weitere Zusätze wie z.B. Halogenide zur Beeinflussung der Fällung enthalten kann. Als weitere Zusätze werden größtenteils

Lösungsmittel wie Dimethylformamid oder Dimethylsulfoxid genannt. Außerdem wird die gute Löslichkeit von Silberjodid in Gegenwart von überschüssigem Jodid in Dimethylformamid erwähnt.^[53]

Die Löslichkeit von Silberjodid in Natriumchlorid und Wasser liegt laut Power und Power bei 0,0244 g AgI in 26,31 g NaCl in 100 g mit Wasser bei 15 °C. Als optimale Komplexlösung nennen Power und Power den Anteil an 50 %igem Natriumiodid in einer Wasserlösung und 14,5 g AgI. Weitere Mischverhältnisse der Komplexlösungen werden im Patent aufgeführt und sind in der Abbildung 14 zu sehen.^[49]

Sodium Iodide - Silver Iodide - Water		
Temp. 25° C.		
Grams per 100 grams of water		
Sodium iodide (NaI):		Silver iodide (AgI)
59.29		21. 21
67.47		28. 52
134.1		99. 54
156.9		124. 6
Potassium Iodide - Silver Iodide - Water		
Temp. 15° C.		
Grams per 100 grams of Saturated Solution		
Potassium iodide (KI):		Silver iodide (AgI)
59.16		53. 15
57.15		40. 0
50.0		25. 0
40.0		13. 0
33.3		7. 33
25.0		2. 75
21.74		15. 76
20.0		0. 80

Abbildung 14: Übersicht über die Mischverhältnisse von Silberjodid mit Kal und NaI.^[49]

Merryweather untersuchte die Löslichkeit von AgI in Pentaerythriol – tetranitrat (PETN). Die Abbildung 15 zeigt die erhaltenen AgI-Partikeln bei unterschiedlichen Konzentrationen. In der Kältekammer konnte Merryweather bei unterschiedlich niedrigen Temperaturen die Anzahl von bis zu $1,7 \cdot 10^{15}$ AgI-Kristallen erzeugen.^[54]

Fuse core in grains/foot		Cold chamber temperature (° C.)	Total AgI particles produced per gram of AgI in fuse core
AgI	PETN		
1.7	40	-12	1.5×10^{11}
1.7	40	-12	3.4×10^{11}
1.7	40	-12	4.0×10^{11}
1.7	40	-12	4.6×10^{11}
5.0	45	-12	1.3×10^{11}
5.0	45	-13	1.3×10^{11}
5.0	45	-13	2.0×10^{11}
5.0	45	-13	3.6×10^{11}
5.0	45	-13	2×10^{12}
10.0	50	-8.5	3.2×10^{10}
10.0	50	-8.5	8.5×10^{10}
10.0	50	-12	8.5×10^{10}
10.0	50	-12	1.7×10^{11}
10.0	50	-12	5.1×10^{11}
10.0	50	-12	1.3×10^{12}
10.0	50	-15	8.5×10^{12}
10.0	50	-15	1.7×10^{13}
10.0	50	-17	1.7×10^{11}
18.0	39.0	-17	1.1×10^{10}
18.0	39.0	-19	1.1×10^{10}

Abbildung 15: Mischverhältnisse von AgI mit PETN und gebildete AgI Kristalle.^[54]

Steel und Krebs führen 1966 in ihren Untersuchungen an, dass AgI eine höhere Löslichkeit unter Verwendung eines AgI-NH₃ Komplexes von bis zu 60 % AgI aufweist und der AgI-KI-Komplex im Vergleich dazu keine bessere Löslichkeit aufzeigt.^[55]

Fukuta und Paik bezeichnen die eigenen erzeugten beta-AgI Kristalle als die den Eiskristallen am nächsten kommende Kristallstruktur. Dabei haben sie einen AgI-KI-Aceton Komplex verwendet, um beta-AgI Kristalle zu erzeugen.^[56] Rosinski und Nagamoto haben AgI mit den Komplexen AgCl, AgBr und mit AgI getestet und herausgefunden, dass alle Komplexbildner dazu geeignet sind, Eiskristalle zu erzeugen. Der Komplex mit AgI-KI + H₄C₄O₂NBr (N-bromosuccinimid) wird als ideale Impflösung empfohlen.^[31] Johnson und Mönig haben 1975 bei einer Mischung von 2:1 AgI-NH₄I also 2 Mol AgI und 1 mol NH₄I gleiche Effekte wie bei einer Mischung von 3 AgI-NH₄I + 6H₂O entdeckt. Diese Mischungen produzierten eher hexagonale AgI-

Kristalle.^[57] Edwards und Evans beschrieben 1968 die Herstellung der Silberjodid-Lösung. Danach wird in eine mit Silberjodid gesättigte 0,2 molare AgNO_3 Lösung hergestellt. Fünf ml dieser Komplexlösung werden dann mit 95 ml Wasser vermischt. Danach werden drei ml dieser Lösung entnommen, um es mit 10 ml der gesättigten AgNO_3 zu mischen.^[58]

Davis untersuchte 1969 die Ergebnisse unter einem Elektronenmikroskop. Er verwendet eine 2,5 Mol AgI und 1 Mol NaI Komplexlösung und füllt diese mit Aceton auf. Die andere Lösung mit 3 Mol AgI und 2 Mol NaI mit $n - \text{Mol H}_2\text{O}$ die wiederum mit Aceton versehen wird, hat er als Vergleichslösung hergestellt. Mit diesen Mischverhältnissen hat er eine kubische also die gamma-kristalline Form erzeugen können. Unter dem Elektronenmikroskop wurden lediglich die Kristalle mit einer kubischen Form untersucht. Davis konnte die eiskristallbildende Eigenschaft der gamma-AgI-Kristalle bestätigen.^[59]

Die typischen Eisstrukturen mit ihren alpha-/beta-/gamma-Strukturen wie sie in Abbildung 16 zu sehen sind, haben Auswirkungen auf die Eiskeimbildungsfähigkeit bei unterschiedlichen Temperaturen.^[24]

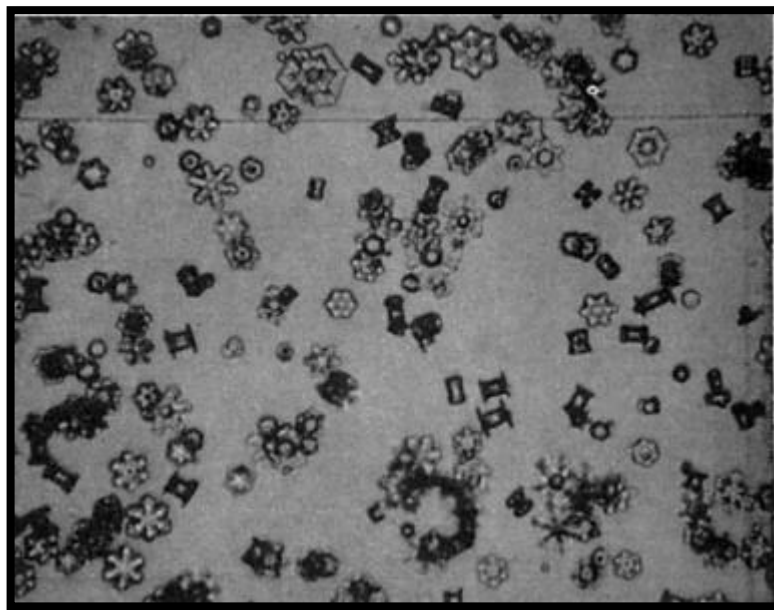


Abbildung 16: Hexagonale und kubische Eiskristallformen von Silberjodid.^[24]

1975 meldete die ehemalige Firma CIBA-GEIGY ein Patent zur Herstellung von Silberjodid-Partikeln an, die effektiver in der Eiskristallbildung laut den Untersuchungsergebnissen sind, wie die bisher vorhandenen Lösungen. Hierbei handelt es sich um ein hochdisperses Gemisch aus Silberhalogeniden und organischen Hochpolymeren. Das Gemisch weist eine spezifische Oberfläche von bis zu 500 m² pro g auf, hat eine Korngröße die kleiner ist als 1 µm und liegt in einer Konzentration von 0,1 bis 10 Gew. % bezogen auf das Gemisch vor. Als Silberhalogenid wurden Silberchlorid, Silberjodid oder Silberbromid verwendet. Das organische Hochpolymere in Form des unlöslichen Aminoplastharzes oder das Harnstoff-Formaldehyd-Kondensationspolymere wurde näher in Betracht gezogen, da diese ab etwa 200 °C unter Zersetzung schmelzen können. Das Gemisch hat die Zusammensetzung von 4-5 Gew. % Silberhalogenid und 96-95 Gew. % des Hochpolymers. Zusätzlich werden 20 Gew. % bezogen auf die gesamte Mischung hinzugefügt. Bei der Zugabe des Silberhalogenids wird unter Ausschluss von sichtbarem und ultraviolettem Licht gearbeitet, um eine Zersetzung zu vermeiden. Die genaue Herstellungsweise wird in dem Patent beschrieben. Die Versuche zeigten eine effektive Niederschlagsbildung.^[60]

5.5.1 Die Messung der Effizienz im Labor und in realen Bedingungen

Die Effizienz der gezeigten Untersuchungsergebnisse müsste unter Laborbedingungen und in realen Bedingungen nachprüfbar sein.

Die Bestimmung der Keimbildungsfähigkeit im Labor läuft nach Ciba-Geigy wie folgt ab:

Ein Gefrierkeimbildungsgerät mit Auszählung wird verwendet bei dem ein zylindrisches, senkrecht stehendes 10 Liter Messinggefäß, das oben mit einem Plexiglas abgeschlossen ist. Das Gefäß ist von außen mit einer Kühlschlange umfasst und wird mit z.B. einem Fluorcarbon gefüllt, dass die Temperatur von -10 °C bis -20 °C kühlen kann. In der Mitte des Gefäßes befindet sich ein elektrisch betriebener Luftbefeuchter mit einem seitlich angebrachten Thermometer. Am Boden des Gefäßes werden die Eiskristalle

aufgefangen bzw. dort können diese Niederschlagen. Von oben durch das Plexiglas wird mit hellem Licht das Gefäßinnere beleuchtet.^[60]

Der Versuch läuft dann wie folgt ab: Eine vorher definierte Zuckerlösung wird im unterkühlten Zustand auf den Boden in das Innere des Zylinders geleitet so, dass der Boden bedeckt wird. Die gekühlte Luft zusammen mit der gewünschten Lösung wird über dem Luftbefeuchter in das Gefäß geführt und mit der gewünschten Masse befeuchtet. Es entsteht ein Nebel der Eiskristalle enthält, die dann auf die Zuckerlösung am Boden des Gefäßes fallen und ausgezählt werden können. Die Ergebnisse können anschließend mit anderen verwendeten Mitteln verglichen werden. Nach 8 Versuchen konnten eine durchschnittliche Anzahl von $4 \cdot 10^{13}$ Eiskristalle ausgezählt werden. Die Versuche an Wolken wurden über ein Weinanbaugebiet in Südfrankreich in der Zeit von 1971 bis 1973 durchgeführt. Die Messungen ergaben die Reduktion der Hagelbildung um bis zu 71 %.^[60]

Kampe und Weickmann haben die Effektivität der Eiskristallbildung ebenfalls in einer Eiskammer wie folgt gemessen:^[61]

Die Eiskammer wird jeweils vor Versuchsbeginn gelüftet. Durch Ventilatoren wird Luft eingesogen und durch eine Kühlschlange geführt, um die Eiskammer auf die gewünschte Temperatur einzustellen. Die Ventilatoren werden so angeordnet, dass keine Eiskristalle miteingesogen werden können. Sobald sich ein Nebel in der Kammer mit einer Temperatur von zwei Grad Celsius bildet, die mit der Temperatur im Frühstadium der Cumulonimbus Wolken vergleichbar ist, wird über eine Glasfront die Fläche von einem Kubikzentimeter ausgeleuchtet und die Eiskristalle visualisiert. Zum Vergleich der Eiskristallbildung wird eine kleine ein Liter Kammer mit einer polierten Nickelplatte von 2 Quadratzentimeter Fläche mittig angeordnet. Heißer Dampf wird dann in die Kammer mit jeweils Silberjodid oder Cobaltjodid gefüllt und die Kammer anschließend abgekühlt.^[61] Beide Versuche ergaben ähnliche Mengen an Eiskristallen. Die Ergebnisse waren somit vergleichbar. Aufgrund der Ergebnisse genügt nach Kampe und Weickmann eine Konzentration von ein bis 10 Eiskristallen pro Liter feuchte Luft, um die Wolken abregnen lassen

zu können. Als effektive Temperatur zur Wolkenimpfung wird $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ angegeben, die in den Wolken herrschen sollte. Der Beginn der Wolkenimpfung wird ebenfalls im Frühstadium der Gewitterwolkenbildung mit einer Temperatur von ab $-5,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ angesetzt.^[61]

Die Effizienz der Eiskristallbildungsfähigkeit wird unter realen Bedingungen nach der Ausbringung von Silberjodid an Wolken über zwei Methoden gemessen. Die erste Methode ist die Verteilung von ein Quadratmeter großen Styroporplatten in fünf Kilometer Abständen im Gebiet über dem Silberjodid ausgebracht wird. Die Geschwindigkeit und Größe der Hagelkörner kann anhand der hinterlassenen Spuren berechnet werden. Die Untersuchung der Oberfläche der Styroporplatten unter einem Mikroskop gibt Aufschluss darüber, wie sehr das Silberjodid an der Hagelbildung beteiligt gewesen ist.

Als eine weitere Methode ist die Wolkenauflösung mittels GPS-Daten bekannt. Hierfür ist eine ständige Kommunikation zwischen einem meteorologischen Überwachungsbüro und dem Flugzeug erforderlich. Die aufgezeichneten GPS-Daten geben die Flugbahn des Flugzeugs wider. Die Radardaten des Überwachungsbüros zeigt das Verhalten der Wolke. Beim Vergleich beider Daten können Rückschlüsse getroffen werden darüber, ob die Wolkenimpfung erfolgreich war hinsichtlich der Niederschlagsbildung oder der Auflösung der Wolke.

5.5.2 Wirksamkeit von AgI-Komplexen in Laborversuchen

Als eine der Eigenschaften von Silberjodid wird die Adsorptionsfähigkeit zur Bildung von Eiskristallen an der Oberfläche der einzelnen Partikel angeführt. Daher müsste die Wirksamkeit von AgI-Komplexen hinsichtlich ihrer Eiskristallbildungsfähigkeit unter Laborbedingungen nachprüfbar sein.

Birstein fand im Laborversuch heraus, dass die Keimbildungsfähigkeit von Silberjodid-Partikel nicht nur auf das Vorhandensein von unterkühlten Wassertropfen beschränkt ist, sondern Eiskristalle an der Oberfläche von Silberjodid-Partikel direkt aus dem Wasserdampf gebildet werden können.^[62] Die Eiskristallbildungsfähigkeit einer AgI-NaI-Aceton Lösung wurde 1969 in einer Eiskammer einmal mit trockener und einmal in feuchter Luft mit dem

Ergebnis durchgeführt, dass mehr Eiskeime in trockener und warmer Luft erzeugt werden, wie bei Anwesenheit von feuchter Luft.^[63] Finnegan hat unterschiedliche Konzentrationen einer AgI-AgCl-Aceton Lösung untersucht und herausgefunden, dass bei -20 °C alle Konzentrationen dafür geeignet sind, Eiskristalle zu bilden. Nach dem Vergleich mit einer reinen AgI-Aceton Lösung hatte die AgI-AgCl-Aceton Lösung eine bessere Keimbildungsfähigkeit bei Temperaturen um die 0 °C gezeigt.^[64] Bei einem wiederholten Eiskeimbildungsversuch mit Silberjodid hat Vonnegut angemerkt, dass nicht nur die Fähigkeit zur Eiskristallbildung Untersuchungsgegenstand sein sollte, sondern die Geschwindigkeit, die maßgeblichen Einfluss auf den Niederschlag habe.^[65] Die Effizienz des AgI-AgCl Komplexes konnte 1990 jedoch nur im Labor bestätigt werden, signifikante Effekte konnten nach einer Ausbringung an einer Wolke nicht bestätigt werden.^[66]

Fukuta versuchte eine Erklärung für die Eiskristallbildungsfähigkeit von Silberjodid zu geben und untersuchte verschiedene Substanzen, die nicht wasserlöslich und kristallartig sind. Dabei stellte er fest, dass die Substanzen die eine ähnliche Struktur wie die Eiskristalle haben, ab einer Temperatur von -11 °C Eiskristalle bilden.^[67]

Die Formel zur Berechnung der Anzahl an gebildeten Eiskristallen wird in der Formel (2)^[68] angegeben.

$$N = N_0 * [1 - e^{-J*t}] \quad (2)$$

Dabei ist laut Formel (2) N_0 die anfänglich vorhandene und gemessene Anzahl an Eiskristallen, und J die Bildungsrate also die Geschwindigkeit der Eiskristallbildung pro Sekunde, t ist die Dauer der Wolkenimpfung in Sekunden.^[68]

Fletcher hat bereits 1958 die optimale Ausbringungsmenge anhand der damals vorhandenen Silberjodid-Brenner mit dem Ergebnis untersucht, dass zwischen -7 °C und -20 °C die Brenner bereits optimale Ergebnisse bei einer Verbrennungstemperatur von 1100 °C erzielen.^[69] Bestätigend dazu konnte

bei einer Wiederholung des Versuchs durch Edwards und Evans Eiskristalle gebildet werden, wenn das Silberjodid einen Durchmesser von 6 Nanometer bis 7,5 Nanometer hatte und Temperaturen zwischen -8 °C und -9 °C herrschten. Darüber hinaus entstanden Eiskristalle auch durch Silberjodid-Partikel mit einem Durchmesser von 9 Nanometer bis 10 Nanometer bei Temperaturen zwischen -6 °C und -7 °C. Weitere Versuche zeigten, dass die Silberjodid-Partikel einen Durchmesser von 10 Nanometer bis 40 Nanometer haben sollten, um eine gewünschte Effizienz aufzuweisen. Die Angaben stehen unter dem Vorbehalt, dass die Eiskristallbildungsfähigkeit von Silberjodid auch mit kleineren Partikeln möglich ist..^[58]

Agl-Partikel die in Wasser mit einem Komplex gelöst sind, zeigen eine erhöhte Eiskristallbildung in niedrigeren Temperaturen. Dabei macht es keinen Unterschied, ob die monodispersen Silberjodid-Partikel in einer Lösung mit 107,8 g KI und 100 g Wasser gelöst sind oder ob das Agl in einer Komplexlösung mit 127,5 g KI und 100 g Wasser vorliegt. Die Wirksamkeit von Silberjodid zur Eiskristallbildung liegt nach dieser Ansicht nicht an der gelösten Menge an Silberjodid, sondern beruht auf der Verwendung von monodispersen Silberjodid-Partikeln. Die monodispersen Partikel, die zur Anwendung kamen, hatten einen Durchmesser von 10 Nanometern und wurden von dem Skyfire Brenner erzeugt..^[2]

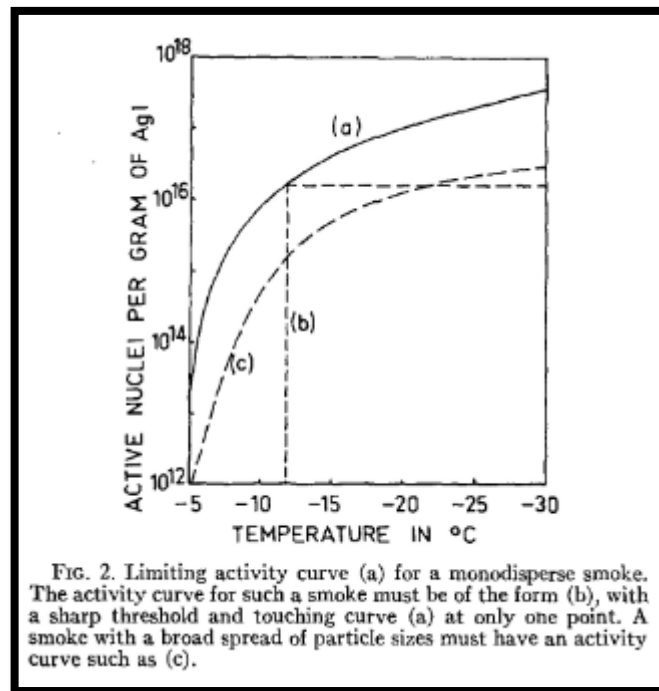


Abbildung 17: Die Anzahl der erzeugten AgI – Kristalle bei unterschiedlichen Temperaturen.^[2]

Abbildung 17 zeigt die Anzahl der Eiskristalle, die Silberjodid bei unterschiedlichen Temperaturen zwischen -5 °C und -30 °C bilden kann.

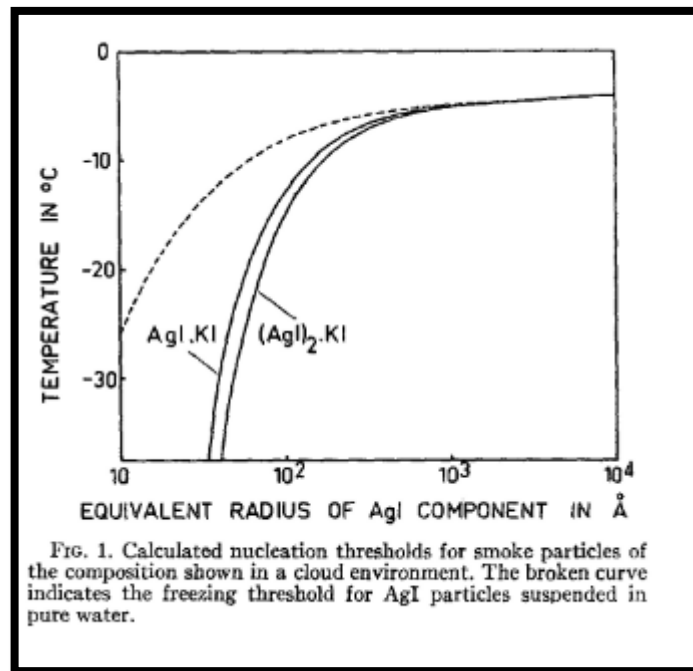


Abbildung 18: Durchmesser der Kristalle, die aus AgI-KI, (AgI)₂-KI und AgI bei verschiedenen Temperaturen entstehen.^[2]

Die Abbildung 18 zeigt, welche Größe die Eiskristalle die aus dem AgI-KI Komplex, dem (AgI)₂-KI Komplex und aus Silberjodid bei unterschiedlich tiefen Temperaturen entstehen können. Hiernach erreicht Silberjodid für die damalige Messmethode höchstens einen Durchmesser von 10 Nanometern und ist wirksam bei etwa -25 °C bis -7 °C.^[70]

1967 haben dann Layton und Steger die Eiskristallbildung der AgI-NH₄I-Wasser Komplexlösung untersucht.^[71] Dabei wurde festgestellt, dass das Silberjodid bei einer Partikelgröße zwischen 20 und 50 Nanometer und bei etwa -20 °C und bei 150 Nanometer Partikelgröße bei -16 °C nicht aktiv sei. Andere Partikeldurchmesser zeigen eine wirksame Eiskristallbildung.^[72] Für eine AgI-AgBr-Komplexlösung fanden Vonnegut und Chessin 1971 die optimale Löslichkeit von AgI in AgBr mit 30 Mol % heraus. Die Löslichkeit stieg bis zu einer Konzentration von maximal 50 Mol % AgI und bei einer Temperatur von 127 °C.^[73]

Die Eiskristallbildung von Silberjodid wurde zuletzt 2010 in China mit dem Ergebnis untersucht, dass die Eiskristalle bei unterschiedlichen Temperaturen gebildet werden. Dabei kamen die erzeugten beta-Agl Kristalle mit einem durchschnittlichen Durchmesser von 90 Nanometer, der Struktur der Eiskristalle in den Wolken am Nächsten. Nach dieser Methode werden beta-Agl Kristalle dadurch erzeugt, indem das Agl Pulver mit der Bezeichnung N-Agl aus einer 0,1 Mol/Liter AgNO Lösung und 0,1 Mol/L KI Lösung mit verschiedenen darin enthaltenen Dispergiermittel gemischt wird. Dabei wird die AgNO Lösung durch eine dünne Nadel unter Rühren bei Raumtemperatur in die KI-Lösung getropft. Nach einer Stunde fallen dann die in der Lösung gebildeten N-Agl Partikel aus. Nach der anschließenden Filtration und dem Spülvorgang mit demineralisiertem Wasser wird die Trocknung bei 135 °C eingeleitet. Durch den Trocknungsprozess entstehen dann zusätzlich alpha-Agl-Kristalle. Die beta-Agl Kristalle weisen nach dieser Methode eine höhere spezifische Oberfläche auf und sind schon bei -6 °C aktiv, d.h. wirksam bei der Eiskristallbildung.^[43] Alle genannten Methoden sind wirksam bei der Eiskristallbildung unter Laborbedingungen.

5.5.3 Agl-Komplexe und die Effekte in Cumulonimbus Wolken zu unterschiedlichen Zeitpunkten

Die Agl-Komplexe sind nach obigen Ausführungen wirksam unter Laborbedingungen. Die Wirksamkeit müsste auch beim direkten Impfen der Wolken gegeben sein.

Während der Entstehung der Cumulonimbus Wolken, also in der Frühphase der Entwicklung, können in den oberen Wolkenschichten bei -10 °C die Wolken mit Agl geimpft und kleinere Hagelkörner zum Niederschlag gebracht werden. Negative Ergebnisse werden nur bei einer Impfung während der späten Phase des Lebenszyklus der Wolke erzielt. Die Wolken zeigen dann örtlich höhere Eiskonzentrationen auf, die nicht mehr zum Niederschlag gebracht werden können.^[74] Die in der Wolke gefundenen Verunreinigungen können die Eiskeimbildung von Silberjodid zusätzlich hemmen. Die Hemmung spielt aber eine unwesentliche Rolle, da die Hemmungswirkung mit zunehmenden Temperaturen ansteigt und abnehmenden Temperaturen wie

sie in Gewitterwolken zu finden sind, abnimmt.^[75] In Wintermonaten kann bei einer Impfung der Wolken mit Trockeneis oder Silberjodid-Partikel in Gewitterwolken bei Temperaturen zwischen -13 °C bis -18 °C und einem Gegenwind von 38 km/h nach knapp einer halben Stunde nachgewiesen werden. Die gemessene Anzahl an Eiskristallen in der Umgebung erhöht sich danach um einen Faktor von 200.^[76] In einem randomisiertem Verfahren scheint es in einem Zeitraum von 4 Jahren in einem Temperaturbereich von -5 °C und -25 °C und einer Ausbringungsmenge von bis zu 200 g AgI pro Stunde, keine signifikanten Unterschiede zwischen der geimpften und nicht geimpften Wolke zu geben.^[77]

5.5.4 AgI-Komplexe und die Effekte in stratiformen Wolken

In den stratiformen Wolken konnte ebenfalls nachgewiesen werden, dass die Aussaat von Silberjodid im Frühstadium einer Gewitterwolkenbildung wesentlichen Einfluss auf die mikrophysikalischen und dynamischen Eigenschaften der Wolke ausübt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die frühe Impfung der Wolke größeren Einfluss hat wie zu einem späteren Zeitpunkt. Zudem konnte gezeigt werden, dass die Menge an Silberjodid nicht linear zu einer verbesserten Niederschlagsbildung steht.^[78]

Die Anzahl der erzeugten Eiskristalle lässt sich nach der Formel (3)^[78] berechnen.

$$Na = e^{[-0,022*(T_0-T)^2+0,88(T_0-T)-3,8]} \quad (3)$$

Laut Formel (3) ist T_0 die gemessene Temperatur an der Wolke und T ist die absolute Temperatur bei 273,15 K. Bei -20 °C ist die effektivste Eiskristallbildung von 160 Stk. pro Liter gezählt worden.^[78]

5.5.5 AgI-Komplexe und die Effekte bei Sturm

Die Eiskristallbildung bei der Wolkenimpfung mit geringen Mengen an Silberjodid ist im Vergleich zur Wolkenimpfung mit größeren Mengen bekannt. In Stürmen spielt die Geschwindigkeit der Aufwinde eine große Rolle für die Bildung von Eiskristallen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die neue Eiskeimbildung bei großen Aufwärtsströmungen geringer ist, als bei kleineren Aufwindgeschwindigkeiten. Damit verringert sich auch die Wahrscheinlichkeit der Niederschlagsbildung bei Ausbringung von Silberjodid-Partikel in diesen Regionen. In mehrzelligen Gewitterwolken ist die Erzeugung von neuen Eispartikel wesentlich erschwerter. Der effektive Bereich in der die neuen Eispartikel um das unterkühlte Wasser konkurrieren können, wird auf die neue Wachstumsregion der Gewitterwolken den sog. Türmchen beschränkt.^[79]

6 Diskussion

Nach Bruintjes reichen die bisher ermittelten Ergebnisse nicht aus, um mit Gewissheit den Erfolg der Methode zur Wolkenimpfung zu bestätigen. Vielmehr sei die Erforschung der mikrophysikalischen Aspekte zur Bildung von Eiskristallen voranzutreiben. Die derzeitigen Kenntnisse über die Niederschlagsbildungsprozesse würden auf den Erkenntnissen aus den 70-80er Jahren beruhen. Deshalb sei es schwierig, eine solide wissenschaftliche Grundlage zur Abschätzung der Größe der erwarteten Wirkung zu schaffen.^[80] Dieser Ansicht sind die über 70 Jahre andauernden Versuche entgegenzuhalten. Die Versuche zur Messung der Eiskristalle im Labor sowie die Auszählung der Silberjodid-Partikel mit Platten haben die Effizienz der verwendeten Mittel gezeigt. Dabei spielte es nur eine geringe Rolle, in welchem Komplex das Silberjodid vorlag. Der Grund für die Verwendung von Silberjodid Lösungen in Komplexen liegt darin, eine höhere Löslichkeit von Silberjodid zu erreichen. Die Menge an gelöstem Silberjodid sollte nach obigen Ausführungen 11 g pro Liter Lösung nicht überschreiten. Weiterhin wird angeführt, dass die Verwendung von monodispersen Silberjodid-Partikel mit einer hexagonalen Kristallstruktur und die Ausbringung mittels einer Überschalldüse, einen wichtigen Einfluss auf die Wirksamkeit der Eiskristallbildung haben. Unter Laborbedingungen hat nicht nur das Silberjodid sondern auch andere Moleküle mit hexagonaler Struktur stets wirksame Eiskristallbildungsfähigkeit. Bei der Wolkenimpfung herrschen unterschiedliche Rahmenbedingungen. Die verschiedenen Höhenlagen der Wolken aufgrund von Landschaften mit oder ohne Gebirge und die variierenden Aufwindgeschwindigkeiten u.v.m. verändern die Rahmenbedingungen für eine wirksame Wolkenimpfung. Daher kann kein Versuchsergebnis mit dem anderen verglichen werden. Die gesammelten Erkenntnisse können somit einen Beitrag zur Entwicklung von Standard Verfahrensweisen bei der Wolkenimpfung leisten, um zukünftig vergleichbare Ergebnisse auch unter realen Bedingungen zu erhalten. Die bisherigen Versuchsergebnisse zeigten trotz unterschiedlichen Wetterlagen und Landschaften eine Reduzierung der Hagelkorngröße oder die Erzeugung von Niederschlägen. Hierfür ist der Lebenszyklus einer Cumulonimbus Wolke und

damit verbunden, der Zeitpunkt der Impfung der Wolke im Frühstadium der Cumulonimbus Wolkenbildung maßgeblich für die Erzeugung des Niederschlags. Die Messung der Aufwindgeschwindigkeit kann nach den oben erwähnten Versuchen einen Anhaltspunkt zum Ort und Zeitpunkt der Impfung geben.

7 Ausblick

Aus der oben aufgeführten Zusammenfassung der Untersuchungen ergeben sich Handlungsweisen bezüglich der zukünftigen Methode zur Impfung von Wolken. Danach kann die Einhaltung der Punkte maßgeblich für den Erfolg oder Misserfolg der Impfung sein. In Abbildung 19 ist die Flugrichtung des Flugzeugs erkennbar. Nach den obigen Ergebnissen ist die Wolkenimpfung in Aufwindzonen stets effektiv. Dabei liegt die Grenze bis zu der die Aufwindzone angefliegen werden sollte, bei Geschwindigkeiten der Aufwinde von bis zu 5 Metern pro Sekunde. Herrschen in den Aufwindzonen Geschwindigkeiten über 5 Metern pro Sekunde, ist die Wirksamkeit der Wolkenimpfung nicht mehr gegeben. Dennoch gab es erfolgreich unternommene Versuche, bei der die Ausbringung von kubischen Agl-Kristallen in die höheren Wolkenzonen getragen und so die frühe Niederschlagsbildung ausgelöst werden konnte.

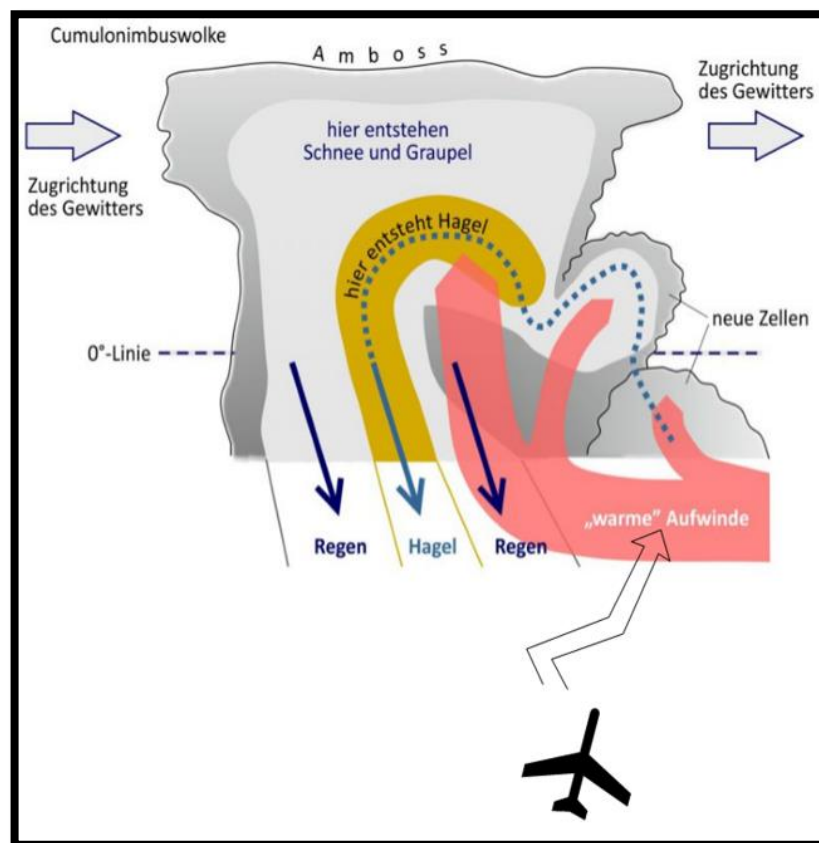


Abbildung 19: Darstellung der optimalen Flugbahn Richtung der Aufwindzonen.^[81]

Automatisiertes Vorgehen:

Impfung der Wolkenbasis

- Ort der Neubildung anfliegen und in Aufwindzonen beginnen,
- Gegenwind einplanen,
- Immer monodisperse Partikel benutzen
- Bei 3 m/s Aufwind oder Neubildung: hexagonale Agl, 100 nm Ø, unverdünnt bis -10 °C,
- Bei Aufwind bis 5m/s: kubische Agl, 10 nm Ø, bis -17 °C möglich,
- Bei Stürmen ineffektiv !

Abbildung 20: Überblick zur optimalen Wolkenimpfung.^[82]

Abbildung 20 gibt einen Überblick über die Vorgehensweise bei der Wolkenimpfung. Dabei sind die Aufwindgeschwindigkeiten von 3 Metern pro Sekunde zu beachten. Die Verwendung von hexagonale Agl-Kristallformen lösen Niederschläge aus bei einem Partikeldurchmesser von 100 Nanometern. Bei Aufwinden von 5 Metern pro Sekunde wird die Ausbringung von kubisch geformten Agl-Kristallen mit einem Durchmesser von 10 Nanometern empfohlen. Die Ausbringung von Silberjodid in der späten Phase der Gewitterwolke bleibt bisher ineffektiv bei der Niederschlagsbildung.

Literaturverzeichnis

[1] http://hagelabwehr-suedwest.de/?page_id=236&nggpage=2, Zugriff am 15.02.2017.

[2] Battan, Louis J. und Richard A. Kassander, 1960. Design of a Program of Randomized Seeding of Orographic Cumuli. In: Journal of Metereology. Vol. 17. S. 583-590.

[3] Deutscher Wetterdienst Bundesoberbehörde, 2017. Wetterlexikon: Hagelentstehung. Offenbach: Deutscher Wetterdienst [Zugriff am: 06.02.2017].

Verfügbar unter:

<http://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101094&lv3=101150>.

[4] Macklin, W.C und G.S. Payne, 1966. A theoretical study of ice accretion process. In: Journal of the Atmospheric Sciences. S. 195-213.

[5] Pflaum, J.C. und H.R. Pruppacher, 1979. A Wind Tunnel Investigation of the Growth of the Graupel Initiated from the Frozen Drops. In: Journal of the Atmospheric Sciences. Volume 36, S. 680-689.

[6] Beheng, Klaus D., 1978. Numerical Simulation of Graupel Development. In: Journal of the Atmospheric Sciences. Vol. 35. S. 683-689.

[7] Mason, B.J., 1956. On the melting of hailstones. In: Q. J. Royal Met. Soc. 82 (352), S. 209-216. DOI: 10.1002/qj.49708235207.

[8] Takahashi, Chuji; Mori, Masaru, 2006. Growth of snow crystals from frozen water droplets. In: 14th International Conference on Clouds and Precipitation, 82 (1-2), S. 385-390. DOI: 10.1016/j.atmosres.2005.12.013.

[9] Karev, Anatolij R.; Farzaneh, Masoud; Kollar, Laszlo E., 2007. Measuring temperature of the ice surface during its formation by using infrared instrumentation. In: International Journal of Heat and Mass Transfer. 50 (3-4), S. 566-579. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.07.015.

[10] List, Roland, 1959. Der Hagelversuchskanal. In: Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP). 10 (4), S. 381-415. DOI: 10.1007/BF01601044.

[11] List, Roland, 1959. Zur Aerodynamik von Hagelkörnern. In: Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP). 10 (2), S. 143-159. DOI: 10.1007/BF01600522.

[12] List, Roland, 1960. Zur Thermodynamik teilweise wässriger Hagelkörner. In: Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP). 11 (4), S. 273-306. DOI: 10.1007/BF01602676.

[13] Battan, J. Louis, 1965. Some Factors Governing Precipitation and Lightning from Convective Clouds. In: Journal of the Atmospheric Sciences. Vol. 22. S. 79-84.

- [14] Selbsterstellte Abbildung mit zusammengestellten Bildern. Quellen (von links nach rechts): <http://www.clipartkid.com/raindrop-clip-art-images-free-for-commercial-use-BYm8E4-clipart/>;
<http://www.snowcrystals.com/photos/photos.html>;
<http://www.news.de/panorama/855067714/riesiges-hagelkorn-fall-fuer-forscher/1/>, Zugriff jeweils am 15.02.2017.
- [15] Ludlam, F.H., 1955. Planning cloud seeding research. In: Arch. Met. Geoph. Biokl. A. 8 (3). S. 283-292. DOI: 10.1007/BR02247287.
- [16] Hobbs, V. Peter und Arthur L. Rangno, 1985. Ice Particle Concentrations in Clouds. In: Journal of the Atmospheric Sciences. Vol. 42, No. 23, S. 2523-2549.
- [17] Hallett, J. und S. C. Mossop, 1974. Production of secondary ice particles during the riming process. In: Nature. Vol. 249. S. 26-28.
- [18] Saunders, Peter M., 1961. An Observational study of cumulus. In: Journal of Meteorology. Vol. 18. S. 451-467.
- [19] Cunning, John B., Henry W. Poor und Mark DeMaria, 1986. An Investigation of the Development of Cumulonimbus Systems over South Florida. Part II: In-Cloud Struktüre. In: Monthly Weather Review. Vol. 114, 1. S. 25-39.
- [20] Squires, P. und J.S. Turner, 2016. An entraining jet model for cumulonimbus updraughts. In: Tellus. 14 (4). S. 422-434. DOI: 10.3402/tellusa.v14i4.9569.

[21] Browning, K. A., F. H. Ludlam und W. C. Macklin, 1962. The density and structure of hailstones. In: J. R. Met. Soc. Vol. 88. S. 75-84.

[22] Ludlam, F. H., 1951. Structure of Shower Clouds. In: Nature. Vol. 167. S. 254-256.

[23] Battan, Louis J., 1970. Summary of Soviet publications on weather modification. In: Bulletin American Meteorological Society. Vol. 51, No. 11. S. 1030-1042.

[24] Dennis, Arnett S., 1980. Weather Modification by Cloud Seeding. In: International Geophysics Series. Vol. 24. Academic Press, Inc. New York. ISBN 0-12-210650-4.

[25] <http://narrotibi.com/wie-entsteht-hagel>, Zugriff am 15.02.2017.

[26] Hoffer, Thomas E., 1961. A Laboratory Investigation of Droplet Freezing. In: Journal of Meteorology. Vol. 18. S. 766-778.

[27] Hoffer, Thomas E. und Roscoe R. Jr. Braham, 1962. A Laboratory Study of Atmospheric Ice Particles. In: Journal of the Atmospheric Sciences. Vol. 19. S. 232-235.

[28] Garvey, M. Dennis, 1975. Testing of Cloud Seeding Materials at the Cloud Simulation and Aerosol Laboratory. In: Journal of Applied Meteorology. Vol. 14. S. 883-890.

- [29] Super, B. Arlin, Jack T. McPartland und James A. Jr. Heimbach, 1975. Field Observations of the Persistence of AgI-NH₄I-Acetone Ice Nuclei in Daylight. In: Journal of Applied Meteorology. Vol. 14. S. 1572-1577.
- [30] Langer, G., G. Cooper, C. T. Nagamoto und J. Rosinski, 1978. Ice Nucleation Mechanisms of Submicron Monodispersed Silver Iodide, 1,5-Dihydroxynaphtalene and Phloroglucinol Aerosol Particles. In: Journal of Applied Meteorology. Vol. 17. S. 1939-1948.
- [31] Rosinski, J. und C. T. Nagamoto. 1974. Silver Halides and Iodine Monobromide Systems as Freezing Nuclei. In: Journal of Applied Meteorology. Vol. 13. S. 778-782.
- [32] Fukuta, N. und Y. Paik, 1976. A Supersonic Expansion Method of Ice Nuclei Generation for Weather Modification. In: Journal of Applied Meteorology. Vol. 15. S. 996-1003.
- [33] Langer, G., J. Rosinski und S. Bernsen, 1963. Organic Crystals as Ice Nuclei. In: Journal of the Atmospheric Sciences. Vol. 20. S. 557-562.
- [34] Evans, L. F., 1966. Ice Nucleation by Amino Acids. In: Journal of the Atmospheric Sciences. Vol. 23. S. 751-752.
- [35] Shen, J. H., K. Klier und A. C. Zettlemoyer, 1977. Ice Nucleation by Micas. In: Journal of the Atmospheric Sciences. Vol. 34. S. 957-960.
- [36] Kraus, E. B. und P. Squires, 1947. Experiments on the Stimulation of Clouds to Produce Rain. In: Nature. Vol. 159. S. 489-491.

[37] Kumai, Motoi und Karl E. Francis, 1962. Nuclei in Snow and Ice Crystals on the Greenland Ice Cap under Natural and Artificially Stimulated Conditions. In: Journal of the Atmospheric Sciences. Vol. 19. S. 474-481.

[38] Orville, D. Harold, Richard D. Farley und John H. Hirsch, 1984. Some Surprising Results from Simulated Seeding of Stratiform – Type Clouds. In: Journal of Climate and Applied Meteorology. Vol. 23, No. 12. S. 1585-1600.

[39] Guo, Xueliang, Zheng Guoguang und Jin Dezhen, 2006. A numerical comparison study of cloud seeding by silver iodide and liquid carbon dioxide. In: 15th International Conference on Clouds and Precipitation. ICCP 200879, S. 183-226. DOI: 10.1016/j.atmosres.2005.04.005.

[40] Najafi, M und Mohammad-Hosseinzadeh, F., 2013. Numerical simulation of deep convective cloud seeding using liquid carbon dioxide. In: Int. Journal Environ. Science Technology. Vol. 10, No. 4. S. 665-676. DOI: 10.1007/s13762-012-0166-z.

[41] Zhekamukhov, M. K. und A. M. Abshaev, 2007. Simulation of Rocket seeding of convective clouds with coarse dispersion hygroscopic aerosol. 1. Condensational growth of the cloud droplets at the salt crystals. In: Russ. Meteorol. Hydrol. Vol. 34, No. 4. S. 228-235. DOI: 10.3103/S1068373909040050.

[42] Hu, Xiuli, Zhou Wenbo, Wang Xizheng, Wu Tao, Jeffery B. Delisio und Michael R. Zachariah, 2016. On the fly green generation and dispersion of AgI Nanoparticles for cloud seeding nuclei. In: J. Nanopart. Res. 18 (7), S. 1-10. DOI: 10.1007/s11051-016-3528-5.

[43] Zhang, Jinghong, Jin Dezhen, Zhao Lei, Liu Xianli, Lian Jianshe, Li Guangyu und Jiang Zhonghao, 2011. Preparation of nano-silver iodide powders and their efficiency as ice nucleating agent in weather modification. In: Adv. Power Technology. 22 (5). S. 613-616. DOI: 10.1016/j.appt.2010.09.006.

[44] Power, Robert F. und Bernard A. Power, 1967. Cloud seeding apparatus. Anmeldung: 17.02.1965. US, Patentschrift US3357926. Veröffentlichung: 12.12.1967.

[45] Amand, Pierre St. Und Irwing Koff, 1974. Uniform size particle generator. Anmeldung: 14.09.1972. US, Patentschrift US3788543. Veröffentlichung: 29.01.1974.

[46] Dessens, J., C. Berthet und J. L. Sanchez, 2009. Mitigation of Hail damages by cloud seeding in France and Spain. In: 5th Conference on Severe Storms.

[47] MacCready, Paul B., 1956. Cloud seeding generator. Anmeldung: 04.09.1951. US, Patentschrift US2741601. Veröffentlichung: 10.04.1956.

[48] Kardas, J. Stanley, 1956. Silver iodide generator. Anmeldung: 05.12.1956. US, Patentschrift US2917464. Veröffentlichung: 15.12.1959.

[49] Power, A. Bernard und Robert F. Power, 1970. Method of cloud seeding. Anmeldung: 03.05.1968. US, Patentschrift US3545677. Veröffentlichung: 08.12.1970.

[50] König, Randall L., 1964. Some Chemical and Physical Properties of Silver Iodide Smokes. In: Journal of Applied Meteorology. Vol. 3. S. 307-310.

[51] Lohse, F. Ora, 1964. Silver Iodide Seeding Generator. Anmeldung: 24.05.1960. US, Patentschrift US3126155. Veröffentlichung: 24.03.1964.

[52] Merrill, D. David, 1967. Cloud Seeding Apparatus. Anmeldung: 16.04.1965. US, Patentschrift US3313487. Veröffentlichung: 11.04.1967.

[53] Keim, Rudolf, R. J. Meyer, E. H. E. Pietsch, A. Kotowski, Margot Becke-Goehring, Karl Christian Buschbeck und das Gmelin-Institut (HRSG), 1972. In: Gmelins Handbuch der anorganischen Chemie. 8. Auflage. Verlag Chemie GmbH Weinheim, Frankfurt 1972.

[54] Merryweather, Patrick John, 1964. Generation of Ice Nucleating Crystals. Anmeldung: 29.05.1961. US, Patentschrift US3127107. Veröffentlichung: 31.03.1964.

[55] Steele, R. L. und F. W. Krebs, 1967. Characteristics of Silver Iodide Ice Nuclei Originating from Anhydrous Ammonia – Silver Iodide Complexes: Part I. In: Journal of Applied Meteorology. Vol. 6. S. 105-113.

[56] Fukuta, N. und Y. Paik, 1971. On the Shape of Silver Iodide Crystals. In: Journal of Applied Meteorology. Vol. 11. S. 744-745.

[57] Davis, B. L., L. R. Johnson und F. John Möng, 1975. An Explanation of the Unusual Nucleating Ability of Aerosols Produced from the AgI-NH₄I-Acetone System. In: Journal of Applied Meteorology. Vol. 14. S. 891-896.

[58] Edwards, G. R. und L. F. Evans, 1968. Ice Nucleation by Silver Iodide: III. The Nature of the Nucleating Site. In: Journal of the Atmospheric Sciences. Vol. 25. S. 249-256.

[59] Davis, L. Briant, 1969. Chemical Complexing of AgI-NaI-Aerosols. In: Journal of the Atmospheric Sciences. Vol. 26. S. 1042-1048.

[60] Ciba-Geigy AG, 1976. Hochdisperse Gemische aus Silberhalogeniden und organischen Hochpolymeren. Erfinder: Hoogewys, Marcel, Dr. und Dr. Alfred Renner. Veröffentlichung: 18.03.1976. Anmeldung: 01.09.1975. DE, Patentschrift DT2538861A1.

[61] Kampe aufm, H. J. und H. K. Weickmann, 1951. The effectiveness of natural and artificial aerosols as freezing nuclei. In: Journal of Meteorology. Vol. 8. S. 283-288.

[62] Birstein, Seymor J., 1954. The Role of Adsorption in Heterogeneous Nucleation, I: Adsorption of Water Vapor on Silver Iodide and Lead Iodide. In: Journal of Meteorology. Vol. 12. S. 324-331.

[63] Blair, N. Donald und Briant L. Davis, 1969. Aging of Silver Iodide-Sodium Iodide Generator Effluent in Moist and Dry Air. In: Journal of Applied Metereology. Vol. 8. S. 551-555.

[64] DeMott, J. Paul, William G. Finnegan und Lewis O. Grant, 1983. An Application of Chemical Kinetic Theory and Methodology to Characterize the Ice Nucleating Properties of Aerosols used for Weather Modification. In: Journal of Climate and Applied Meteorology. Vol. 22. S. 1190-1203.

[65] Vonnegut, Bernard und Mark Baldwin, 1983. Repeated Nucleation of a Supercooled Water Sample that Contains Silver Iodide Particles. In: Journal of Climate and Applied Meteorology. Vol. 23. S. 486-490.

[66] DeMott, Paul J., 1990. Comments on „The Persistence of Seeding Effects in a Winter Orographic Cloud Seeded with Silver Iodide Burned in Acetone“. In: Journal of Applied Meteorology. Vol. 30. S. 1376-1380.

[67] Fukuta, Norihiko, 1957. Experimental Investigations on the Ice Forming Ability of Various Chemical Substances. In: Journal of Meteorology. Vol. 15. S. 17-26.

[68] Fletcher, N. H., 1959. On Ice Crystal Production by Aerosol Particles. In: Journal of Meteorology. Vol. 16. S. 173-180.

[69] Fletcher, N. H., 1959. The Optimum Performance of Silver Iodide Smoke Generators. In: Journal of Meteorology. Vol. 16. S. 385-387.

[70] Fletcher, N. H., 1968. Ice Nucleation behavior of silver iodide smokes containing a soluble component. In: Journal of Atmospheric Sciences. Vol. 25. S. 1058-1060.

[71] Layton, R. G. und John Steger, 1967. Nucleation of Ice on Silver Iodide. In: Journal of Atmospheric Sciences. Vol. 26. S. 518-521.

[72] Gerber, Hermann E., 1970. Size and Nucleating Ability of AgI Particles. In: Journal of Atmospheric Sciences. Vol. 29. S. 391-392.

[73] Chessin, Henry und Bernard Vonnegut, 1971. Lattice Spacings of Pseudobinary Solid Solutions of Silver Bromide and Silver Iodide. In: Journal of the American Chemical Society. Vol. 93. S. 4964-4966.

[74] Farley, Richard D., Chen Hui, Harold D. Orville und Mark R. Hjelmfelt, 2004. Numerical simulation of hail formation in the 28 June 1989. Bismarck thunderstorm: Part II, cloud seeding results. In: 15th International Conference on Clouds and Precipitation. S. 81-113. DOI: 10.1016/j.atmosres.2004.03.006.

[75] Popoff, I. G. und G. W. Sharp, 1958. Inhibition of freezing nuclei by adsorbed contaminants. In: Journal of Meteorology. Vol. 16. S. 288-294.

[76] Hobbs, Peter V. und Lawrence F. Radke, 1975. The Nature of Winter Clouds and Precipitation in the Cascade Mountains and their Modification by Artificial Seeding. Part II: Techniques for the Physical Evaluation of Seeding. In: Journal of Meteorology. Vol. 14. S. 805-818.

[77] Dennis, A. S., J. R. Jr. Miller, D. E. Cain und R. L. Schwaller, 1975. Evaluation by Monte Carlo Tests of Effects of Cloud Seeding on Growing Season Rainfall in North Dakota. In: Journal of Applied Meteorology. Vol. 14. S. 959-969.

[78] Chen, Baojun und Yin Yan, 2014. Can we modify stratospheric water vapor by deliberate cloud seeding? In: J. Geophys. Res.: Atmos. 119 (3). S. 1406-1418. DOI: 10.1002/2013JD020707.

[79] Young, Kenneth C., 1975. Growth of the ice phase in strong cumulonimbus updrafts. In: Pure Appl. Geophys. 113 (5-6). S. 1005-1017. DOI: 10.1007/BF01592971.

[80] Bruintjes, Roelof T., 1999. A Review of Cloud Seeding Experiments to Enhance Precipitation and Some New Prospects. In: Bull. Amer. Meteor. Soc. 80 (5), S. 805–820. DOI: 10.1175/1520-0477(1999).

[81] Selbsterstellte Abbildung unter Einbeziehung der Abbildung [80].

[82] Selbsterstellte Übersicht als Abbildung.

Anhang